

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Studijní program: Strojní inženýrství

Obor: Strojírenská technologie

Zaměření: Obrábění a montáž

Povrchové šetření koncových měrek při interferenční metodě kalibrace v ČMI OI Liberec

Micro-structural analysis of Gauge blocks surface wear during of Interferometric calibration method at CMI OI Liberec

KOM – 1244

Šárka Liscová

Vedoucí práce: Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph. D.

Konzultant: Ing. František Dvořáček (ČMI OI Liberec)

Počet stran: 67

Počet příloh: 4

Počet obrázků: 46

Počet tabulek: 5

02. 01. 2014

Povrchové šetření koncových měrek při interferenční metodě kalibrace v ČMI OI Liberec

Anotace:

Koncové měrky jsou hlavním prostředkem používaným ke standardizaci délek v průmyslu. K jejich kalibraci jsou využívány dvě základní metody, které shrnuje základní norma EN ISO 3650. První z nich využívá pro kalibraci laserovou případně vícevlínnou interferometrii (interferenční metoda). Koncová měrka je v tomto případě nasáta na referenční plochu a pomocí zvolené interferometrické techniky je měřena vzdálenost referenční plochy od volného čela koncové měrky (délka měrky). Druhá z metod je založena na porovnání délky kalibrované koncové měrky s délkou měrky referenční (komparační metoda). V rámci diplomové práce byl zkoumán povrch z hlediska mikrostruktury (mikrostrukturální analýza) koncové měrky během měření interferenční metodou. Bylo prokázáno, že interferenční metoda má výrazný vliv na opotřebení koncových měrek.

Micro-structural analysis of Gauge blocks surface wear during of Interferometric calibration method at ČMI OI Liberec

Anotation:

Gauge blocks are the main means of length standardization used by industry. For their calibration of exact lengths two methods are generally used as summarized by the international standard EN ISO 3650. The first method uses laser or multi-wavelengths interferometry (Interferometric method). In this case Gauge block is wringed onto an auxiliary platen while the distance of the reference platen from the reflecting surface (Gb lenght) is determined by the desired Interferometric technique. The second method is based on the comparison of the Gauge block with a reference Gauge block (comparative method). This study was mainly focuses on the micro-structural analysis of the Gauge blocks surfaces during of Interferometric calibration method. It was found that the Interferometric method has a significant impact on the Gauge blocks wear.

Klíčová slova: koncová měrka, interferenční kalibrace, povrchové šetření

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2014

Archivní označení zprávy:

Počet stran: 67

Počet příloh: 4

Počet obrázků: 46

Počet tabulek: 5

Místopřísežné prohlášení:

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb. o právu autorském, zejména §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Liberec, 02. 01. 2014

Šárka Liscová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří jakkoliv přispěli ke zdárnému sepsání této diplomové práce, zejména však ctěné Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph. D., bez jejíchž cenných rad a připomínek by tato práce vůbec nemohla vzniknout.

Zvláštní poděkování patří rovněž mým rodičům Mileně a Františku Liscovým, kteří mě materiálně zabezpečili a po celou dobu mých studií všemožně podporovali.

Děkuji.

Obsah:

Úvod.....	9
1. Koncové měrky.....	11
1. 1 Krátká historie koncových měrek.....	11
1. 2 Základní parametry koncových měrek.....	12
1. 3 Fyzikální a tepelné vlastnosti koncových měrek.....	15
1. 3. 1 Materiály.....	15
1. 3. 2 Teplotní roztažnost.....	16
1. 3. 3 Rozměrová stabilita.....	18
1. 3. 4 Rovinnost ploch.....	19
2. Interferometr.....	21
2. 1 Interference světla.....	21
2. 2 Stručná historie vzniku interferometru používaného pro kalibraci koncevých měrek.....	23
2. 3 Určení délky koncové měrky pomocí interferometru.....	24
2. 4 NPL interferometr pro kalibraci koncových měrek.....	26
2. 5 Český metrologický institut.....	27
3. Metodika povrchového šetření koncových měrek.....	29
3. 1 Metodika šetření povrchového napětí koncových měrek pomocí rentgenové tenzometrie.....	30
3. 2 Metodika povrchového šetření koncových měrek pomocí optické mikroskopie.....	34
3. 3 Metodika povrchového šetření koncových měrek pomocí mikroskopu AFM.....	37
3. 4 Metodika kalibrace koncových měrek na interferometru TESA NPL v ČMI OI v Liberci.....	40
3. 5 Metodika šetření minimální síly potřebné pro správné nasátí koncových měrek.....	46
4. Experimentální část.....	50
4. 1 Sledované parametry.....	50
4. 2 Vyhodnocení sledovaných parametrů.....	51
4. 2. 1 Rentgenová tenzometrie.....	51
4. 2. 2 Optická mikroskopie.....	54

4. 2. 3. AFM mikroskopie.....	56
4. 2. 4 Měření minimální síly potřebné pro správné nasátí koncových měrek.....	60
5. Diskuze výsledků.....	61
Závěr.....	64
Seznam použité literatury.....	65
Seznam příloh.....	67

Úvod

Používání měřidel délky je běžnou součástí každodenního života snad ve všech oborech lidské činnosti. Pro konkrétní měření je pak zpravidla voleno měřidlo odpovídající svým rozsahem a přesností dané úloze. Pro zajištění deklarované přesnosti měření délky je třeba každé měřidlo pravidelně kalibrovat, přičemž měřidla různých rozlišení a přesností měření tvoří tzv. kalibrační řetězec. V dílenské praxi stojí na konci tohoto kalibračního řetězce koncová měrka. Jedná se zpravidla o ocelový nebo keramický blok používaný jako etalon délky při kalibraci nejpresnějších dílenských měřidel délky, jakými jsou posuvná měřidla a mikrometry. Zejména z důvodu mechanického kontaktu mezi kalibrovaným měřidlem a koncovou měrkou dochází postupně k opotřebení koncové měrky a i tento mechanický etalon je tedy třeba v pravidelných intervalech kontrolovat a kalibrovat [5].

Požadavky na koncové měrky a metodologii jejich kalibrace shrnuje mezinárodní norma EN ISO 3650. V ní jsou popsány dvě základní metody kalibrace koncových měrek. První z nich využívá pro kalibraci laserovou, případně vícevlnnou interferometrii (interferenční metoda). Koncová měrka je v tomto případě nasunuta (nasáta) na referenční plochu a pomocí zvolené interferometrické techniky je měřena vzdálenost referenční plochy od volného čela koncové měrky (délka měrky). Druhá z metod je založena na porovnání délky kalibrované měrky s délkou měrky referenční (komparační metoda). V tomto případě je využito oboustranné kontaktní měření pomocí inkrementálních snímačů délky [5].

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou opotřebení povrchu spojenou s kalibrací koncových měrek interferenční metodou. Práce byla rozdělena do čtyř stěžejních částí.

První z nich byla věnována informacím o koncových měrkách. Byla zde nastíněna krátká historie koncových měrek od počátků metrologie až k současné podobě těchto kalibrů. Dále byly popsány základní parametry těchto kalibrů vymezené mezinárodní normou EN ISO 3650. V závěru byly charakterizovány fyzikální a tepelné vlastnosti koncových měrek.

Druhá část pojednává o interferometrech. Nejprve byla nastíněna krátká historie interferometru. Dále byl popsán způsob určení a výpočtu délky koncové měrky pomocí interferometrické metody. Závěr části byl věnován interferometru TESA NPL AGI 300, který se používá pro kalibraci koncových měrek v Českém metrologickém institutu Oblastním inspektorátu v Liberci.

Třetí část se zabývá metodikou měření koncových měrek na jednotlivých přístrojích. Jedná se o metodiku měření povrchového napětí pomocí rentgenové tenzometrie, o metodiku povrchového šetření pomocí optické mikroskopie, dále pomocí mikroskopie atomárních sil AFM a o metodiku kalibrace koncových měrek na interferometru. Dále se zabývá metodikou měření minimální síly potřebné pro správné nasátí měrek.

Čtvrtá část byla věnována vlastnímu experimentu - analýze povrchové struktury a povrchového napětí koncových měrek při interferenční metodě kalibrace. V této části byly porovnávány výsledky z měření povrchového napětí pomocí rentgenové tenzometrie a výsledky z měření drsnosti povrchu na AFM mikroskopu včetně skenů a detaily z optického mikroskopu před a po kalibraci koncových měrek na interferometru. V rámci experimentálního měření byla také navržena metodika pro měření minimální potřebné síly pro správné nasunutí (nasátí) koncových měrek na referenční desku. V neposlední řadě byly vyhodnoceny výsledky šetření této síly.

Zadání diplomové práce bylo řešeno pro praktické potřeby Českého metrologického institutu v Liberci v rámci projektu TAČR – TA03010663 – Nové systémy pro kontrolu délky koncových měrek a vyhodnocení kvality jejich povrchů.

1. Koncové měrky

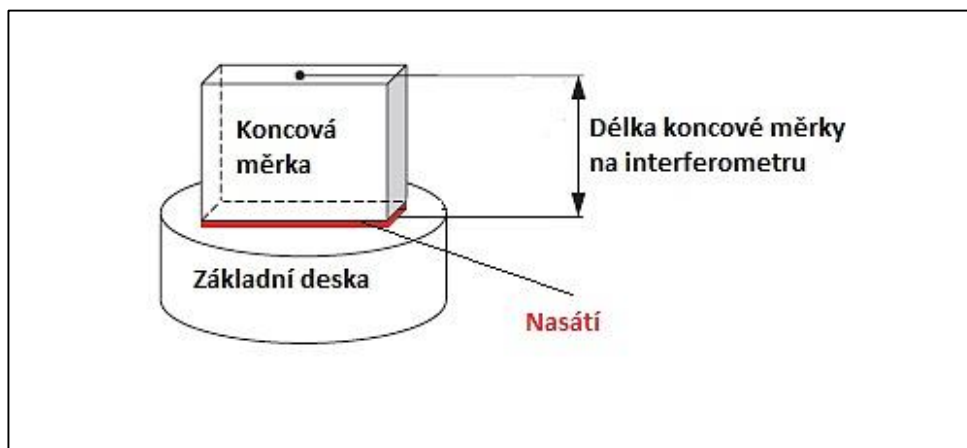
Koncové měrky (dále jen KM) jsou všeobecně uznávány jako základ délkového měření ve strojírenské výrobě. Jsou to etalony délky reprezentující specifický díl délky (metru) mezinárodního systému jednotek SI. Vyrábějí se nejčastěji ve tvaru hranolů o průřezu 9x30 mm do jmenovitého rozměru 10 mm a 9x35 mm nad 10 mm délky. Jejich měřicí plochy jsou opracovány s vysokou rozměrovou přesností, rovnoběžností funkčních ploch a minimální drsností povrchu. Používají se nejčastěji pro nastavení měřidel, měřicích přístrojů a přípravků, k ověřování a kalibraci měřidel a pro přímou kontrolu délkových rozměrů výrobků [1].

1. 1 Krátká historie koncových měrek

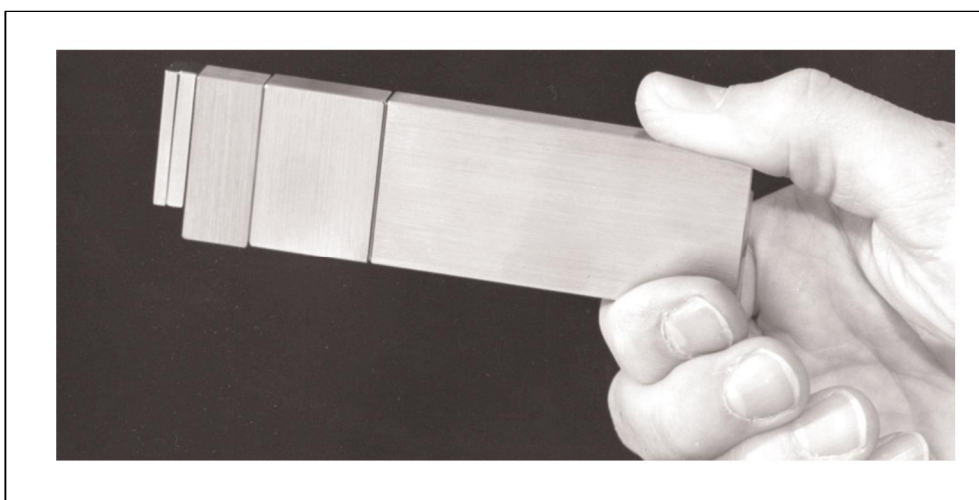
První rozvoj metrologie se projevil během Průmyslové revoluce v 19. století. Továrny se zaměřily na montáž výrobků se zaměnitelnými součástkami a došlo k dynamickému rozvoji obráběcích strojů. Jednou ze stinných stránek tohoto nového systému bylo navýšení počtu kontrolovaných rozměrů a postupné vytvoření systému velkého počtu mezních kalibrů. Údržba těchto kalibrů, kvůli jejich opotřebení při každodenním používání, byla však z důvodu jejich velkého počtu drahá. Zvyšující se kontrola výroby měla za následek vznik těsnějších tolerancí, což vedlo k vývoji dalších měřidel, jako jsou posuvná měřítka a mikrometry. Dalším stupněm pokroku byl vznik výrobních výkresů. Tyto výrobní výkresy, mezní kalibry a měřidla tvořily jádro systému řízení kvality více než 100 let [2].

KM byly převratný vynález ve správnou dobu. Jejich užitečnost je založena na skládání tzv. přílnutím nasunutím (nasátím) povrchů (viz obr. 1 a 2). Carl Edvard Johansson, zaměstnanec továrny na zbraně ve Švédsku, dostal nápad jak omezit počet jednotlivých délkových kalibrů v továrně. Jeho nápad, poprvé formulovaný v roce 1896, je založen na malé sadě měrek stejného průřezu, které je možné kombinovat, čímž se sníží počet potřebných kalibrů. Například velikosti 1 mm, 2 mm, 4 mm a 8 mm umožňují složení v jakékoliv kombinaci v milimetrových velikostech od 1 mm do 15 mm a lze tyto čtyři měrky vyrobit se stejným průřezem. Při správném použití příslušenství a jejich správném sestavení mohly být použity pro téměř jakýkoliv rozměr, a to s větší přesností než měla většina používaných mezních kalibrů [2].

Nyní jsou KM používány jako jedna z hlavních metod měření již více než 100 let. K jejich rozšíření přispěla hlavně relativně nízká cena, zaručující snadnou dostupnost uživatelům, a vysoká přesnost měření.



Obr. 1: Model koncové měrky přilnuté nasunutím (nasátím) na základní desku při interferenční metodě kalibrace [7]

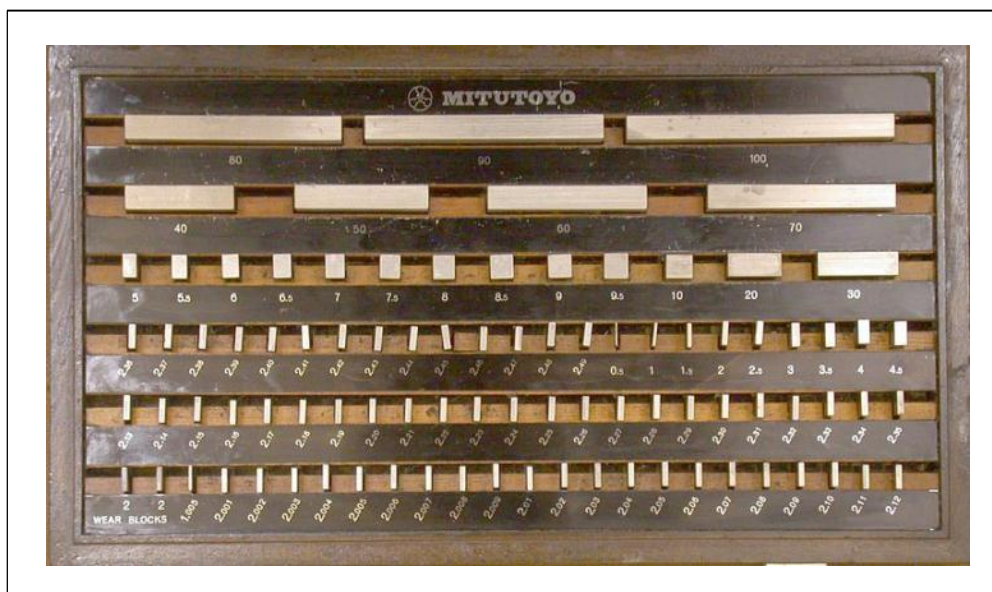


Obr. 2: Koncové měrky složené tzv. přilnutím nasunutím (nasátím) povrchů [2]

1. 2 Základní parametry koncových měrek

Základní sada KM obsahuje zpravidla kolem 100 ks měrek. Požadovaný rozměr kalibru se skládá z jednotlivých měrek, které se spojují tzv. nasáváním (přilnutím nasunutím). Správně nasáté měrky s nepoškozenými funkčními plochami drží spolu vlivem molekulárních přitažlivých sil. Při sestavování rozměrů z jednotlivých měrek je nutno pamatovat na chyby, které mohou ovlivnit celý rozměr. Jsou to vlastní chyby měrky a chyby způsobené nepřesnostmi ve styku dvou měrek (cca 0,1 - 0,2 μm) [1].

Na následujících obrázcích 3 a 4 je vyobrazena sada ocelových KM s přípravky pro jejich používání vyrobené firmou MITUTOYO. Každá sada KM zpravidla obsahuje protokol s naměřenými odchylkami jednotlivých KM.



Obr. 3: Sada koncových měrek [8]



Obr. 4: Sada přípravků pro používání koncových měrek [8]

KM musí být trvale značeny jmenovitou délkou v milimetrech a je-li na měrce uvedena třída přesnosti, musí být použito toto značení dle EN ISO 3650 [1]:

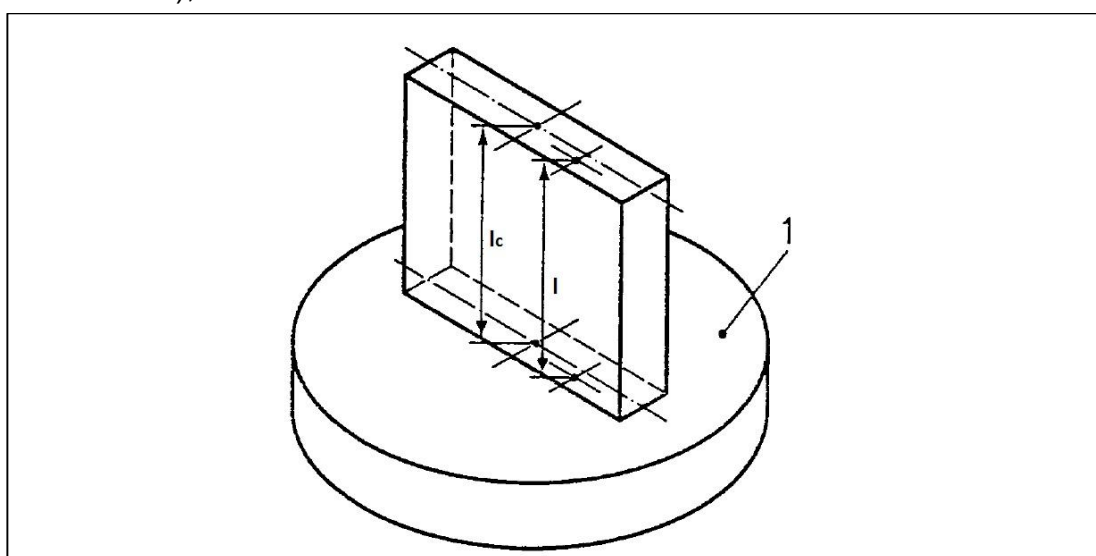
- kalibrační třída K: K
- třída 0: 0
- třída 1: -
- třída 2: =

KM třídy přesnosti K (nejpřesnější) jsou používány pouze pro laboratoře. KM třídy přesnosti 0 jsou využívány jako etalon na kontrolu pracovních KM, dále na seřizování měřicích přístrojů a měřicích strojů s vysokou přesností. KM třídy přesnosti 1 slouží pro kontrolu dílenských KM, kalibrů a na seřizování délkových měřidel. KM třídy přesnosti 2 spadají pod dílenská měřidla a používají se zvláště

jako pracovní a nastavovací měřidla nebo pro kontrolu přesných úchylkoměrů, rovněž jako náhrada za pevné třmenové kalibry.

Základní parametry KM, vycházející z technické normy EN ISO 3650, jsou definovány [1]:

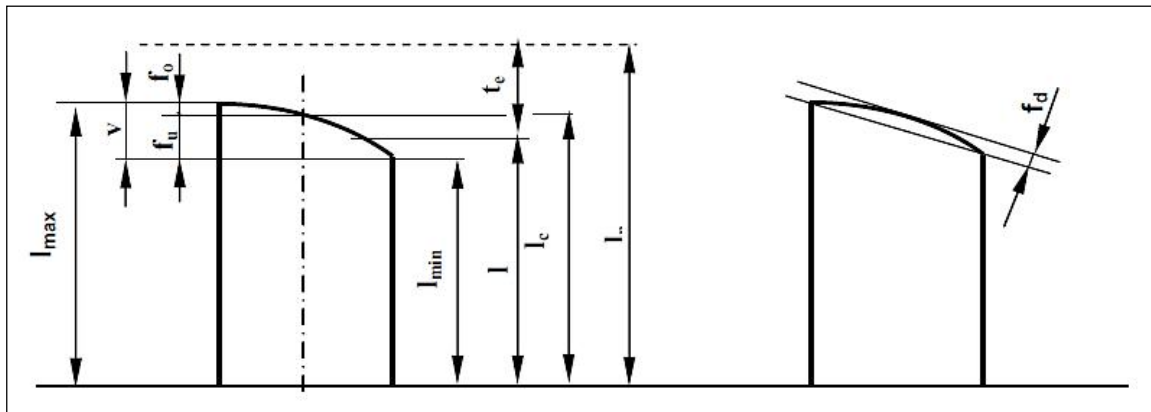
- **délka koncové měrky v libovolném bodě (l)** – kolmá vzdálenost zvoleného bodu volné (nenasáté) plochy od rovinné plochy desky, na kterou je měrka nasáta (viz obr. 5 a 6),
- **středová délka koncové měrky (l_c)** – délka kolmice středu volné měřicí plochy měrky na plochu, k níž měrka přilnula svou druhou plochou (viz obr. 5 a 6),



Obr. 5: Středová délka l_c a příklad délky l v libovolném bodě měřicí plochy koncové měrky, přilnuté na základní rovinnou desku (1 – základní rovinná deska) [4]

- **úchylka délky v libovolném bodě od jmenovité délky (t_e)** – algebraický rozdíl $l - l_n$ (viz obr. 6),
- **úchylka rovinnosti (f_d)** – nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými plochami, mezi kterými leží všechny body měřicí plochy (viz obr. 6),
- **rozpětí délky (v)** – rozdíl mezi největší délkou KM l_{max} a nejmenší délkou l_{min} (rozpětí délky je rovno součtu odchylek f_o a f_u od střední délky l_c) (viz obr. 6),
- **tvrdost měřicích ploch** - musí být min. 800 HV nebo 62 HRC,
- **přilnavost** – schopnost měřicích ploch měrek nasát (přilnout nasunutím) působením molekulárních sil k jiným měřicím plochám nebo na plochy se stejnou úpravou povrchu,

- **teplotní koeficient délkové roztažnosti** – pro ocel při teplotě (10 - 30)°C musí být v rozmezí $(11,5 \pm 1)10^{-6}K^{-1}$, pro jiné materiály musí výrobce hodnotu tohoto koeficientu uvést v dokumentaci.



Obr. 6: Základní parametry koncové měrky [1]

1. 3 Fyzikální a tepelné vlastnosti koncových měrek

1. 3. 1 Materiály

Základní požadavky kladené na materiál KM jsou vysoká tvrdost, otěruvzdornost, korozivzdornost, rozměrová stálost, malý koeficient teplotní roztažnosti, dobrá nasávací schopnost a dobrá obrobiteľnosť. V současné době jsou nejčastěji používanými materiály nástrojová ocel 19 422, jejíž nevýhodou je malá odolnost proti korozi (nutné používat při práci s měrkami rukavice a po skončení práce provést konzervaci), karbid wolframu (WC), který má velmi vysokou tvrdost a otěruvzdornost, a keramika (nejčastěji oxid zirkonu ZrO_2), která má vysokou korozivzdornost a rozměrovou stálost [1].

První KM byly vyrobeny z kalené oceli s povrchovou úpravou lapováním, kdy běžné používání KM vyžadovalo jejich velmi tvrdý povrch. Další předností oceli bylo, že většina průmyslově vyráběných výrobků byla rovněž z oceli. Jestliže má ocelová KM koeficient teplotní roztažnosti stejný jako měřená součást, není již třeba sledování teploty k dosažení přesného měření. Tato problematika bude podrobněji popsána v další kapitole o teplotní roztažnosti.

Největším problémem KM byla vždy rozměrová stálost materiálu. Kvůli procesu kalení a krystalové struktuře používané oceli většina měrek změnila v průběhu času svou délku. Mezi léty 1950 a 1960 probíhal rozsáhlý výzkum zaměřený na tuto problematiku. Bylo zkoumáno mnoho druhů ocelí a procesů kalení a díky tomu byla objevena metoda pro výrobu rozměrově stálých KM. Dodnes používaná kalená nástrojová ocel 19 422 je výsledkem tohoto výzkumu.

Změna délky měrek vyrobených z tohoto materiálu je méně než 1µm během deseti let [4].

V průběhu dalších let byla posuzována vhodnost několika dalších materiálů pro výrobu KM. Z nich jmenujme nejzajímavější karbid wolframu (WC), karbid chromu (CrC) a cervit (sklokeramika) [4].

Měrky z karbidů jsou velmi tvrdé a mají vysokou odolnost proti otěru. Měřicí plochy jsou stejně kvalitní jako u oceli a rozměrová stálost je srovnatelná s ocelí, možná dokonce lepší. Karbid wolframu má velmi nízký koeficient teplotní roztažnosti, asi o dvě třetiny nižší než ocel. Ale kvůli vysoké hustotě tohoto materiálu mají KM poměrně velkou hmotnost. Karbid chromu má srovnatelný koeficient teplotní roztažnosti jako ocel a zhruba stejnou poměrnou hmotnost. KM z karbidů se staly populárními v dílenských podmínkách pro jejich vysokou odolnost povrchu proti opotřebení [4].

Cervit neboli sklokeramika je materiál navržený tak, aby měl téměř nulový koeficient teplotní roztažnosti. Tato vlastnost ho činí atraktivním pro výrobu KM. Stinnou stránkou tohoto materiálu je jeho menší tvrdost než u oceli a křehkost. Zatímco ocelové měrky se mohou pádem poškodit a může být dokonce nutné lapování a rekalibrace, cervitové měrky mají tendenci prasknout a jsou již neopravitelné. Vzhledem k tomu, že téměř nulový koeficient teplotní roztažnosti není užitečnější než nebezpečí spojená s malou tvrdostí a křehkostí, nejsou KM z tohoto materiálu vyráběny [4].

Nyní mnoho společností experimentuje s keramikou na bázi zirkonu, kdy jeden druh už je dokonce na trhu. KM z této keramiky jsou velmi tvrdé a mají koeficient teplotní roztažnosti o 20% nižší než ocel [4].

1. 3. 2 Teplotní roztažnost

Délka KM je definována při normalizovaných okolních podmínkách:

- teplota: 20°C,
- barometrický tlak: 101,325 Pa (1 atmosféra),
- tlak vodní páry: 1,333 Pa (10 mm rtuťového sloupce),
- koncentrace CO₂ ve vzduchu: 0,03%.

Z těchto podmínek má vliv na fyzikální délku měrky pouze teplota. Ostatní podmínky jsou potřebné pro primární měření délky koncových měrek pomocí interferenční metody [4]. Tato problematika bude popsána později.

Většina materiálů mění při působení teploty svůj rozměr. Tato změna závisí na velikosti změny teploty a na teplotě, při které ke změně došlo. Základní rovnice popisující tento účinek:

$$\Delta L/L = \alpha_L \Delta T,$$

kde:

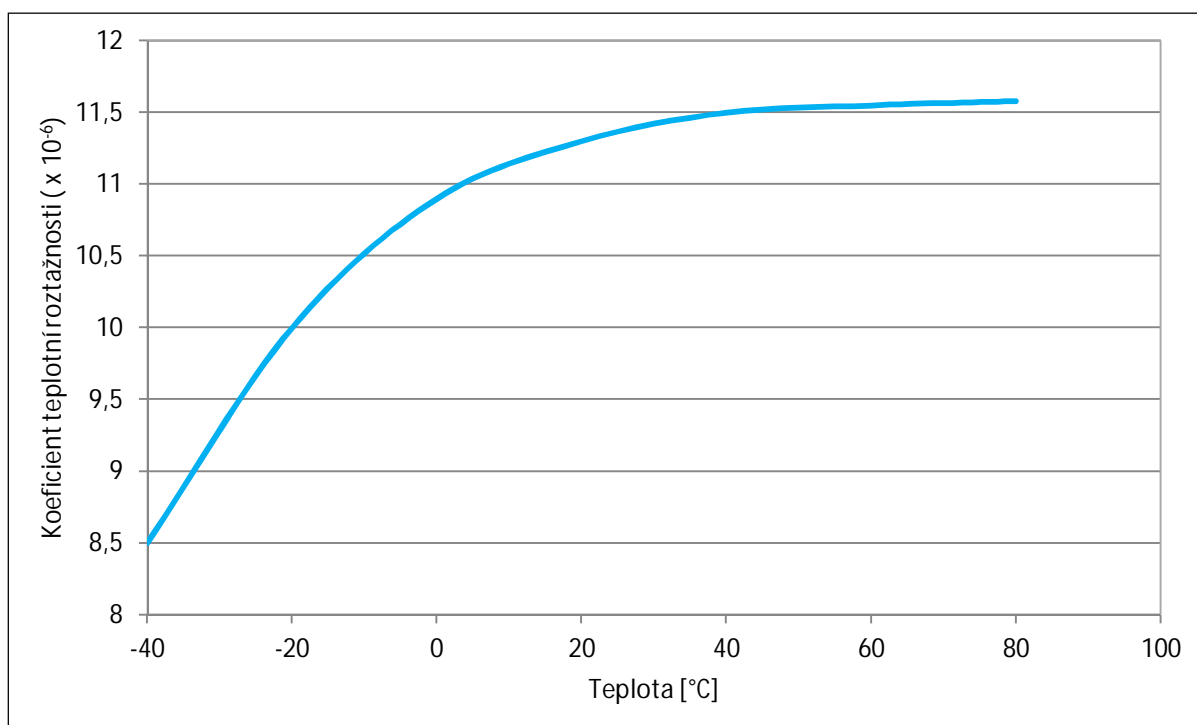
L: délka,

ΔL : změna délky předmětu,

α_L : teplotní koeficient délkové roztažnosti,

ΔT : změna teploty.

Stručně řečeno α_L závisí na absolutní teplotě materiálu. Na následujícím obr. 7 je ukázán naměřený koeficient teplotní roztažnosti ocelových KM v závislosti na teplotě. Tento grafický vývoj je typický pro většinu materiálů, teplotní roztažnost stoupá s teplotou [4].



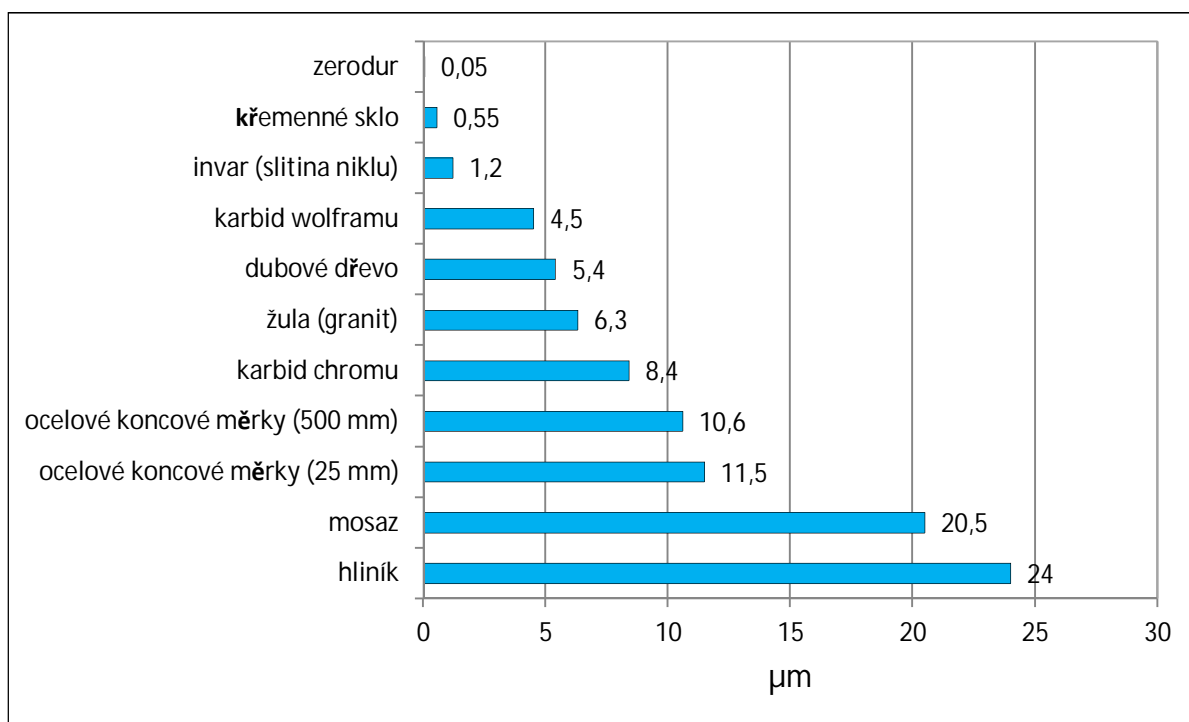
Obr. 7: Grafické vyjádření změny koeficientu teplotní roztažnosti ocelových koncových měrek v závislosti na teplotě [4]

Například KM vyrobená z oceli má koeficient teplotní roztažnosti $11,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, to znamená, že měrka dlouhá 100 mm se při zvýšení teploty o 1°C zvětší o $1,15 \mu\text{m}$. Toto je významná změna délky, protože i u měrek druhé třídy přesnosti se předpokládá maximální změna délky $0,2 \mu\text{m}$ z nominální hodnoty. To znamená, že pro dlouhé kalibry může být vliv teploty zásadní. Pokud se na to podíváme zpětně, pro změnu délky $0,25 \mu\text{m}$ z nominální délky KM 500 mm, potřebujeme změnu teploty pouze o $0,043^{\circ}\text{C}$. Ocel však byla pro KM, i přes její velkou teplotní roztažnost, materiálem číslo jedna. Důvodem je, že většina měřidel a výrobních strojů je vyrobena z oceli a teplotní účinky mají tendenci se vyrušit [4].

Existuje několik směsí materiálů, jako jsou slitiny kovů, například invar (slitina niklu) a směsi z krystalického skla, například zerodur, které mají velmi malé koeficienty teplotní roztažnosti. U těchto materiálů je využita kombinace dvou

složek, z nichž jedna se s rostoucí teplotou zvětšuje a druhá zmenšuje. Jedná se o směs, ve které roztažnost jedné složky odpovídá smrštění složky druhé. Je zřejmé, že dva materiály nikdy nebudou mít přesně opačné teplotní závislosti, rovnající se roztažnost a smrštění může být pouze při jedné teplotě. Tudíž je nutné si uvědomit, že tyto materiály jsou určeny pro použití pouze při jedné teplotě, obvykle 20°C. Příklady takových materiálů jsou super-invar (slitina niklu), zerodur a cervit [4].

Na následujícím obr. 8 jsou znázorněny relativní délkové změny na 100 mm vzorcích různých materiálů při změně teploty z 20°C na 25°C.



Obr. 8: Grafické znázornění teplotní roztažnosti 100 mm vzorků z různých materiálů při změně teploty z 20°C na 25°C [4]

1. 3. 3 Rozměrová stabilita

Žádný materiál není rozměrově stabilní. Vzhledem k procesům vznikajícím na atomární úrovni mají všechny materiály tendenci se během času zmenšovat nebo zvětšovat. Velikost a směr rozměrových změn je závislý na výrobním procesu, a to jak na zpracování základního materiálu, tak i na dokončovacích operacích. Kolem roku 1950 uskutečnili výrobci KM a mezioborová skupina metalurgů a metrologů rozsáhlé studie vlastností KM pro optimalizaci jejich rozměrové stability. Měrky jsou od té doby ve srovnání s jejich předchůdci pozoruhodně stabilní, ne však dokonale [4].

Ocel, karbid chromu a karbid wolframu jsou velmi osvědčené stabilní materiály pro KM. Novější keramické materiály mohou být stabilnější, ale zatím ještě nebyla učiněna žádná studie, která by toto tvrzení potvrdila. Až budou

dostupné studie, jako je kratší kalibrační cyklus za prvních několik let, můžeme považovat měřky z tohoto materiálu za stabilní [4].

1. 3. 4 Rovinnost ploch

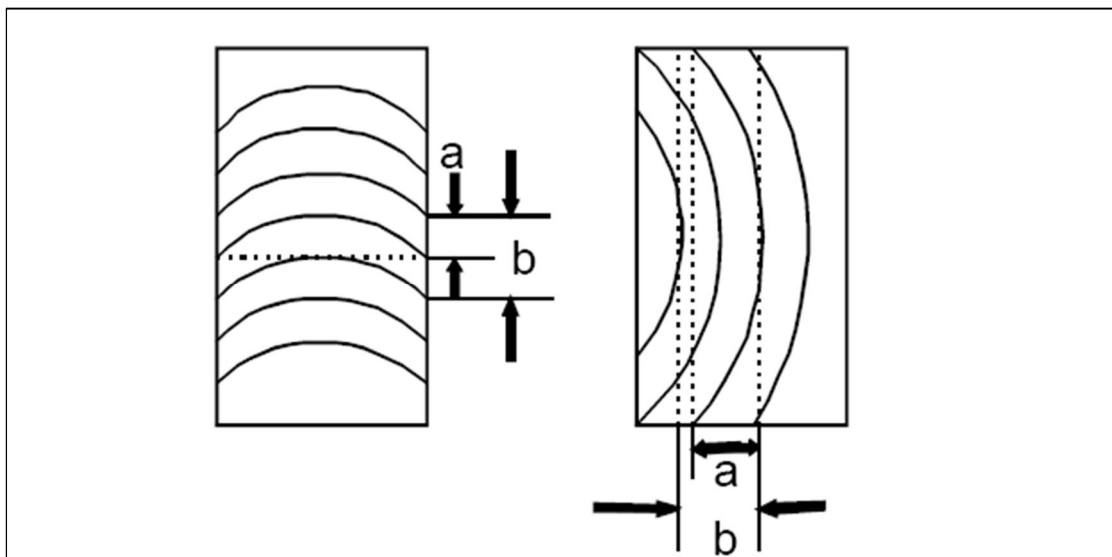
Je popsáno několik metod, které se používají pro charakterizování geometrie KM. Je důležité mít na paměti, že tyto metody poskytují jen omezené množství údajů o tom, co považujeme za komplexní geometrický tvar. Nejčastěji se používá interferenční metoda měření rovinnosti ploch KM. Pro přesnější měření nebo pro trvalý záznam je vhodné vzory interferenčních proužků vyfotografovat. Geometrie KM potom může být posuzována individuálně uživatelem zkoumajícím daný problém.

Měření rovinnosti

Toto měření je prováděno interferometricky pro kontrolu nasátí měrek nebo jejich případné poškození před vlastním měřením délky. S výhodou se pro kontrolu rovinnosti KM používá nasátí měrek na skleněnou referenční plochu. Nasátý povrch je možné pozorovat přes průhlednou skleněnou plochu. Rozhraní mezi plochou skla a KM, pokud je správně nasáta, by mělo být homogenní šedé barvy. Jakékoliv světlejší nebo barevné odlišení označuje špatný kontakt způsobený nedokonalou rovinností měřky nebo špatným nasátím. Po úspěšném nasátí je horní (nenasátá) plocha kontrolována interferometricky na rovinnost. Tento postup se opakuje na všechny plochy měrek [4].

Pro měření rovinnosti se používají různé typy interferometrů. U všech typů jsou tvořeny vzory interferenčních proužků vznikající dopadáním monochromatického záření na plochu KM. Tyto proužky jsou opticky porovnávány s proužky utvářenými stejným způsobem na referenční ploše se známou rovinností, na kterou jsou KM nasáty. Vzhledem k tomu, že je obecně potřeba přesnost 25 nm, nároky na světelný zdroj jsou celkem malé. Jako zdroj světla postačí zářivka se zeleným filtrem. Pro náročnější přesnosti musí být použit laser nebo spektrální lampa [4].

Referenční deska musí splňovat dva základní požadavky. Za první musí být dostatečně velká, aby pokryla celý povrch měřky, obvykle průměr 70 mm nebo větší. Za druhé musí být referenční plocha dostatečně rovinná, aby každé zakřivení mohlo být považováno za zakřivení měřky. Typické referenční desky s odchylkou rovinnosti do 25 nm na průměr 70 mm bývají dostačující. Obrázek 9. 1 a 9. 2 znázorňuje typické vzory interferenčních proužků. Úhel referenčního zrcadla je nastaven tak, aby přes celou šířku plochy měřky vedlo 8 až 9 proužků (obr. 9. 1) nebo 6 až 7 proužků vedoucích podélně přes plochu měřky (obr. 9. 2) [4].



Obr. 9. 1 a 9. 2: Typické vzory interferenčních proužků používané pro měření rovinnosti koncových měrek pomocí interferenční metody [4]

Tyto vzory interferenčních proužků mohou být interpretovány jako obrysové mapy. Ideální rovné plochy vykazují stejnoměrné rovnoběžné proužky. Body podél proužků jsou body stejné výšky a velikost zakřivení proužků je tedy měřítkem rovinnosti.

Zakřivení = a/b (v proužkách).

Například a/b je asi 0,2 proužku na obr. 9. 1 a 0,6 proužku na obr. 9. 2. Přepočet se provádí pomocí známé vlnové délky světla. Každý proužek představuje polovinu vlnové délky násobenou rozdílem vzdálenosti mezi referenční plochou a plochou koncové měrky. Pro měření rovinnosti se často užívá zelené světlo, které je v tomto případě asi 250 nm na proužek. Tudíž obr. 9. 1 ukazuje odchylku rovinnosti 50 nm a obr. 9. 2 ukazuje odchylku rovinnosti 150 nm [4].

2. Interferometr

Interferometr je přístroj pro velmi přesná měření, jehož princip je založen na interferenci světla. Interferometry se používají k měření délek (pak se nazývají interferenční komparátory), k určení indexů lomu u plynů a u kapalin (pak se nazývají interferenční refraktometry) a k určení jemné struktury spektrálních čar (pak to jsou interferenční spektroskopy).

Geometrie KM pomocí interferometru je měřena již téměř 100 let, kdy jedinou významnou změnou v této technologii byl v r. 1950 vývoj stabilizovaného laseru jako zdroje světla. Všechny modely interferometrů měří délku KM na principu porovnání délky měřky k vlnové délce použitého zdroje světla. Dále umožňují měřit rovinnost, jak již bylo výše zmíněno. Kalibrace KM pomocí interferometru je obvykle prováděna v akreditované laboratoři nebo v jednom z národních metrologických institutů [4].



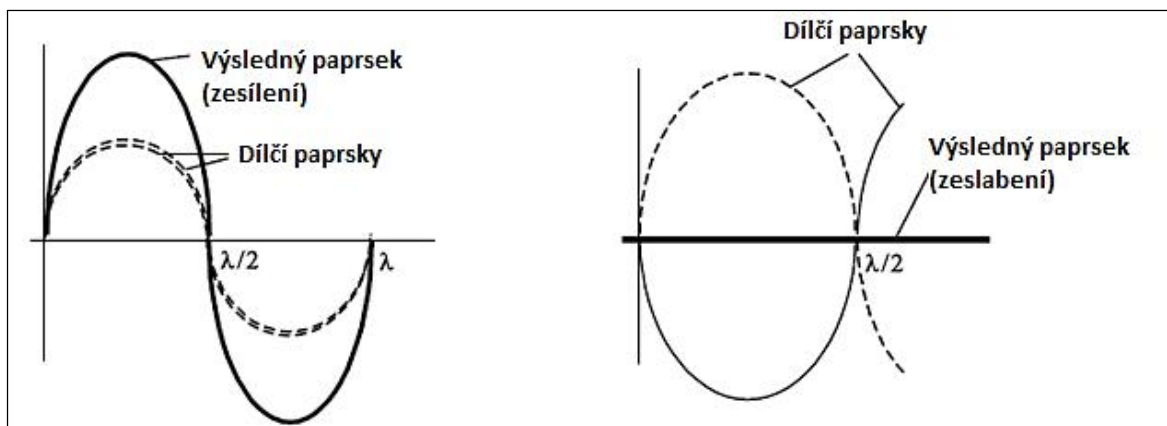
Obr. 10: Interferometr TESA NPL AGI 300 používaný ke kalibraci koncových měrek v Českém metrologickém institutu Oblastním inspektorátu Liberec

2. 1 Interference světla

Interference je založena na vlnové podstatě světla. Jednotlivé částice světla kmitají kolmo k pohybu šíření světla (příčné vlnění). Maximální výchylka od střední polohy se nazývá amplituda A , její velikost určuje intenzitu světla, která je přímo úměrná čtverci amplitudy [1].

Světlo každého zdroje je složeno z různých jednobarevných světél o určité vlnové délce λ . K rozdělení světla na jednotlivé složky se využívá lomu a rozkladu v hranolu nebo ohybu na ohybové mřížce. Interferovat mohou jen paprsky koherentní, tj. vycházející z jednoho zdroje. Interference nastává tehdy, setká-li se v tomtéž bodě několik periodických kmitů, které mají stejné periody a konstantní na čase nezávislá fázová posunutí. Rozdělíme-li koherentní světelný paprsek

na dva, můžeme každý vést jinou optickou dráhou a pak je spojit. Dráhy obou paprsků budou různě dlouhé, to znamená, že do místa spojení přijdou v různých fázích, tj. pozorujeme jejich vzájemné zesílení nebo zeslabení. Z tohoto fázového posunutí můžeme usuzovat na dráhový rozdíl paprsků a tento dráhový rozdíl vypočítat [1].

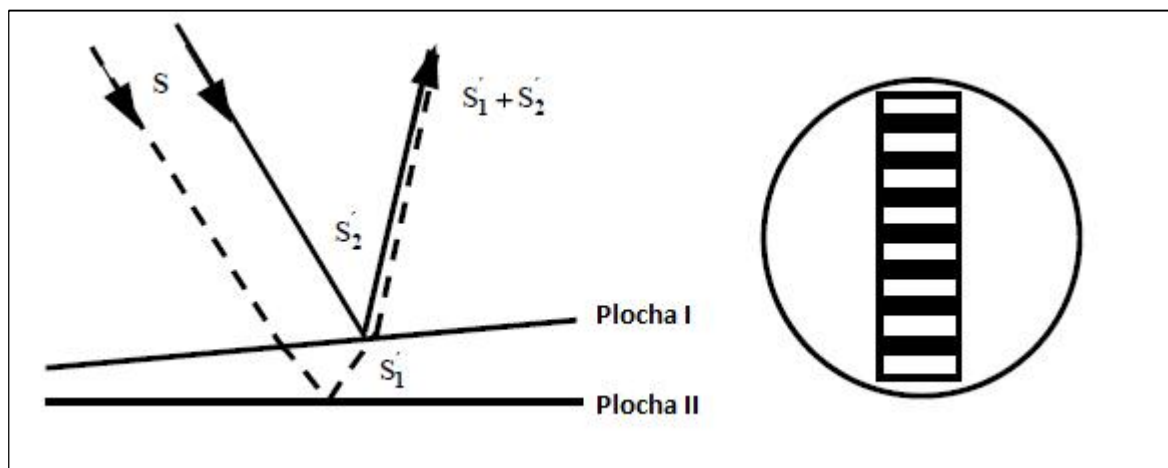


Obr. 11: Zesílení a zeslabení světla interferencí [1]

Je-li dráhový rozdíl obou paprsků od jejich rozdělení k opětovnému spojení roven lichému násobku půlvln, vznikne tma. Je-li dráhový rozdíl nulový nebo je-li roven celistvému násobku vlnových délek, je výsledná amplituda dvojnásobná a intenzita světla se zesílí, jak je vidět na obr. 11. Představíme-li si světlo jako vlnoplochy, pak v místech, kde nastává zeslabení a zesílení intenzity světla, dostaneme interferenční proužky používající se k měření, které jsou znázorněny na obr. 12 [1].

Rozdělení paprsků se v měřicí technice nejčastěji provádí planparalelní destičkou, hranoly s dělicí rovinou nebo destičkou, kde dělicí rovina nebo destička je opatřena polopropustnou vrstvou. Tato polopropustná vrstva rozděluje dopadající paprsek na dva: jeden paprsek propouští na zrcadlo, druhý paprsek dopadá na měřenou součást, od které se odráží zpět. Tento způsob se nejčastěji používá u interferenčních komparátorů nebo interferenčních mikroskopů [1].

Vznik interference nejlépe poznáme na klínové vrstvě. Položíme-li na hladkou lesklou plochu planparalelní destičku a lehce ji nakloníme, vznikne mezi oběma styčnými plochami tenký vzdušný klín, jak je vidět na obr. 12 [1].



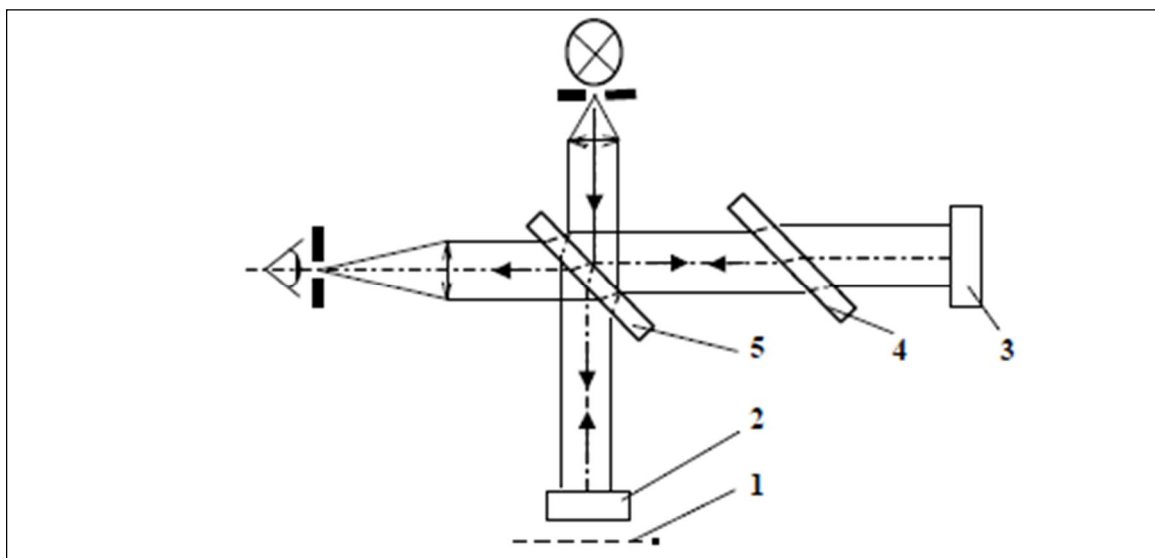
Obr. 12: Vznik interference v klínové vrstvě a interferenční proužky na měřené ploše [1]

2. 2 Stručná historie vzniku interferometru používaného pro kalibraci koncových měrek

Kalibrace koncových KM je obvykle prováděna na speciálně zkonstruovaných interferometrech. Vědci Michelson a Benoit jako první provedli v r. 1893 porovnání standardního etalonu délky s vlnovou délkou červeného světla emitovaného kadmíem. Ve skutečnosti provedli opačný experiment s tím, na co dnes pohlížíme jako na interferometrii KM. Kalibrovali vlnovou délku použitím etalonu délky jako referenčního. Tato myšlenka způsobila předdefinování metru ve spektroskopické vlnové délce. A konečně nejnovější znovunadefinování metru v r. 1983 jako vzdálenosti, kterou urazí světlo za malý zlomek vteřiny [3].

Michelsonův interferometr

Celá řada přístrojů využívajících interference světla je založena na principu Michelsonova interferometru (viz obr. 13).

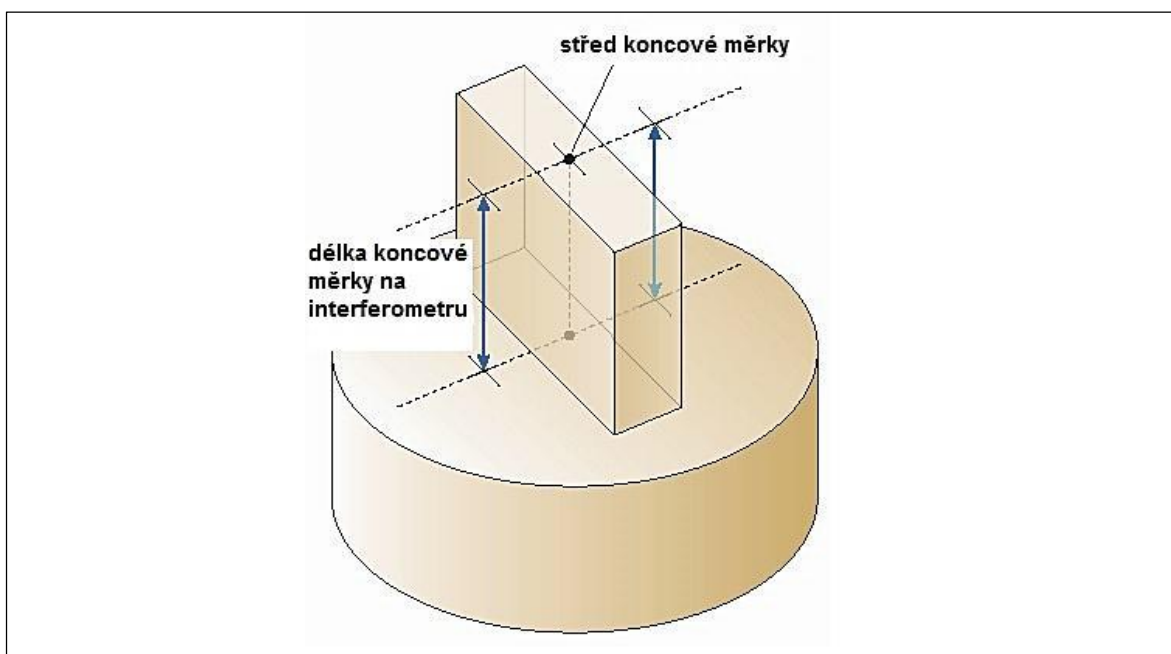


Obr. 13: Schéma Michelsonova interferometru [1]

Svazek vstupujících paprsků se na polopropustné desce 5 dělí do dvou svazků, které se odrážejí od zrcadel 2 a 3. Odražené paprsky se opět vracejí, interferují na polopropustné desce a vycházejí z přístroje. Obraz zrcadla 3 v polopropustné desce leží v referenční rovině 1 a nakloněním zrcadla 2 vznikne klínová vrstva, která vyvolá vznik interference. Paprsky odražené od polopropustné desky 5 procházejí deskou na rozdíl od druhého paprsku dvakrát a pro kompenzaci je vložena do druhého svazku paprsků deska 4 [1].

2. 3 Určení délky koncové měrky pomocí interferometru

V určitém sledovaném bodě (nejčastěji ve středu) KM je prováděno porovnání mezi fyzikální délkou KM a optického záření o známé vlnové délce (viz obr. 14).



Obr. 14: střed koncové měrky - sledovaný bod, kde je prováděno měření [6]

Nejčastěji je používána vlnová délka červeného stabilizovaného helium – neonového laseru o hodnotě 633 nm, nebo zeleného o hodnotě 543 nm. Ale obecně jsou používány i ostatní vlnové délky laseru nebo spektrálních lamp. Délka KM v tomto procesu je definována jako kolmá vzdálenost od středu horní plochy měrky k rovinnému povrchu (základní desky) stejného materiálu, na který jsou měrky nasáty spodní plochou. Tato definice má dvě výhody. Za prvé, specifická základní deska z identického materiálu a povrchové úpravy jako má KM minimalizuje efekt fázového posunu, který se v interferometrii vyskytuje, a který je třeba korigovat. Za druhé, dvojí praktické použití, kdy pomocí měrek ze stejného materiálu a se stejnou povrchovou úpravou (ze stejné sady) je možné vytvořit společným nasátím požadovanou délku. Definovaná délka každé měrky již

zahrnuje vrstvu přilnutí (během měření jsou měrky přilnuty nasunutím na základní desku) vylučující potřebu korekce této vrstvy, když jsou měrky nasáty k sobě [4].

Před měřením délky KM na základě optické vlnové délky je obecně potřeba několika kroků. Za prvé musí být KM nasáta na rovinnou základní desku. Dále musí být tato deska s nasátými měrkami vložena do interferometru a ponechána nějaký čas, než dojde k dosažení teplotní rovnováhy základní desky s KM a okolím. Obvykle bývá tato teplota kontrolována na normalizovanou referenční teplotu 20°C. Po dosažení teplotní rovnováhy může měřicí proces začít. Modelové rovnice použité pro určení délky KM jsou následující. Zaznamenávaným výsledkem je odchylka d , což je odchylka aktuální délky koncové měrky l od její délky nominální L .

$$d = l - L, \quad (1)$$

$$d = l_{\text{fit}} - L + l_t + l_w + l_\alpha + l_A + l_n + l_G + l_\varphi. \quad (2)$$

Parametry rovnice (2) nyní budou detailně popsány a vysvětleny [3].

Hlavním ovlivňujícím parametrem, který musí být korigován je parametr l_{fit} . Jedná se o základní vypočtenou délku korigovanou pro podmínky neideálního prostředí. Koriguje se technikou známou jako metoda přesných zlomků. Tato technika je založena na měření pomocí několika vlnových délek, které jsou porovnávány oproti každé další jako řada možných řešení. Dříve se používaly čtyři vlnové délky, dnes už se za pomoci softwaru používají pouze dvě. Nicméně tato metoda umožňuje řešení pouze tam, kde je vhodná podobnost mezi výsledky získanými pro různé vlnové délky. S pečlivým výběrem použitých vlnových délek vede metoda přesných zlomků k jednomu řešení, kde výsledky všech použitých vlnových délek se blíží nominální hodnotě L . Nominální hodnota KM by měla být před měřením interferometrem zkontrolována, a to pomocí méně přesných mechanických měřidel nebo podle výsledků z předchozího měření [3].

Výraz l_t vyjadřuje teplotní korekci délky měrky:

$$l_t = \Delta T \alpha_L, \quad (3)$$

$$\Delta T = 20^\circ\text{C} - t_g. \quad (4)$$

Kde:

ΔT : odchylka teploty měrky t_g od 20°C,

α_L : teplotní koeficient délkové roztažnosti.

Výraz l_w reprezentuje tloušťku vrstvy přilnutí mezi měrkou a základní deskou. Délka KM je definována již s jednou touto vrstvou přilnutí. Tím se při pozdějším použití měrek při jejich sestavení počítá jako nulová. Nicméně rozdílnost technik přilnutí jednotlivých operátorů a různá kvalita přilnutí na různé základní desky vede k odchylkám tloušťky vrstvy přilnutí a tím i k nejistotě l_w při porovnávání jednotlivých měření [3].

Korekce l_{Ω} je nezbytná pro zahrnutí konečné velikosti apertury (otvoru) optiky interferometru pro korekci nesouměrnosti (kososti). A další zbytkové chyby vlnoplochy optiky jsou zahrnuty do výrazu l_A [3].

Vzhledem k tomu, že měření probíhá na vzduchu, je potřeba korekce l_n pro index lomu vzduchu n . Tato korekce zahrnuje rozdíl mezi vlnovou délkou laserového světla v prostředí, ve kterém probíhá měření, a kalibrovanou vlnovou délkou tohoto světla ve vakuu.

$$l_n = (n - 1) L. \quad (5)$$

Výpočet indexu lomu vzduchu n se obvykle provádí použitím empirických rovnic na základě parametrů měření, kterými jsou tlak vzduchu p , teplota vzduchu t_a a vlhkost vzduchu h [3].

Geometrické vady KM, které mohou mít vliv na určení délky měrky jako je například nedokonalá rovinnost povrchu, jsou zahrnuty do parametru l_G [3].

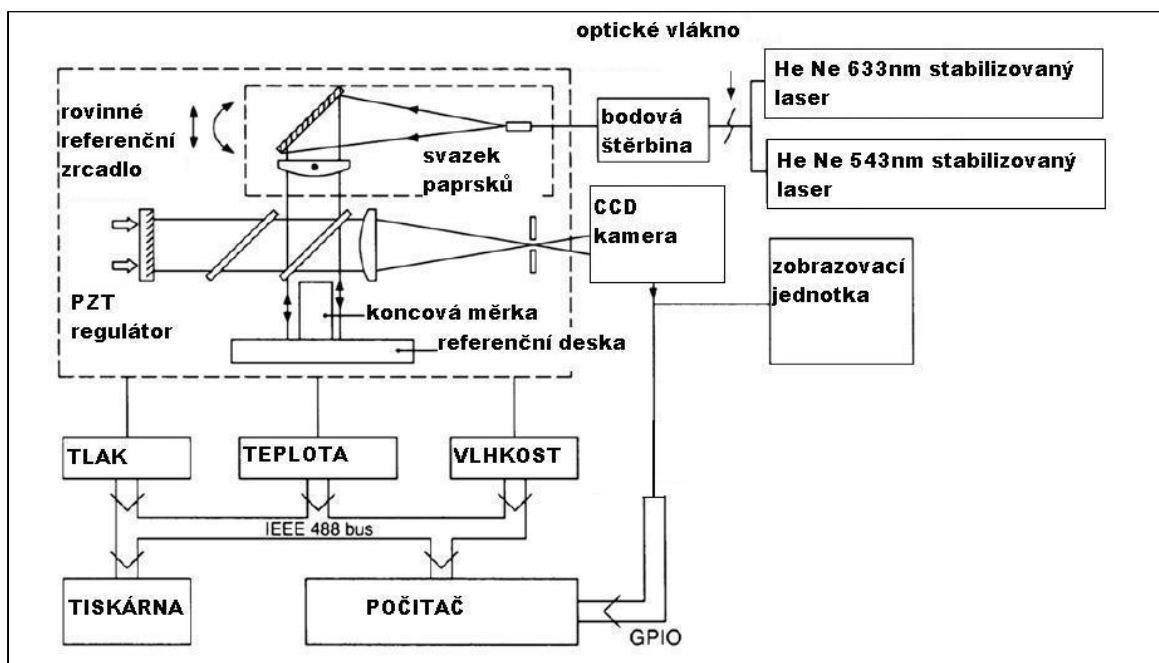
Rozdíly v drsnosti povrchu a komplexními indexy lomu mezi základní deskou a povrchem KM (které zahrnují rozdíly mezi zdánlivou optickou délkou a mechanickou délkou) jsou řízeny tzv. korekcí fáze laseru l_{ϕ} [3].

V souhrnu pro stanovení délky KM musíme změřit ve stejném čase pro každou vlnovou délku: tlak vzduchu p , teplotu vzduchu t_a , vlhkost vzduchu h , teplotu koncové měrky t_g . Rovněž potřebujeme znát kalibrovanou hodnotu každé vlnové délky λ_i (ve vakuu) a přesný odhad délky L . Dále operátor (nebo výpočetní systém) interferometru potřebuje detailně znát korekci tloušťky vrstvy přilnutí l_w , korekci optiky l_A a l_{Ω} , korekci geometrie l_G a korekci fáze laseru l_{ϕ} . U starších interferometrů bylo určení mnoha těchto parametrů prováděno vizuálně operátorem pohledem na vzor proužků přes okulár a zjištění hodnot teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu přečtením analogických přístrojů. Pro každou KM byla požadována několikanásobná určení těchto parametrů, což vyžadovalo nepřetržité znovuzaostřování a přizpůsobování operátorova oka. Není překvapením, že práce operátora byla velmi unavující a chyby ve výsledcích způsobené operátorem nebyly neobvyklé [3].

2. 4 NPL interferometr pro kalibraci koncových měrek

Za účelem snížení času měření, zvýšení přesnosti a eliminace chyb operátora byl navržen a postaven nový typ automatického interferometru pro měření KM. Jedná se o interferometr speciálně vyvinutý Národní fyzikální laboratoří (National Physical Laboratory, NPL). Nový přístroj těžil z několika technologických vynálezů 80. let 20. století. Jednalo se o užití přístrojů se standardizovanými počítačovými rozhraními (GPIB/IEEE-488), programovatelnými mikropočítači, uživatelsky upravitelnou elektronikou pro vzorkování obrazu, která dokáže pracovat i s rychlostí snímků videa, a stabilizovaným helium-neonovým

laserem vyvinutým NPL, který umožňuje redukci počtu vlnových délek ze čtyř na dvě. Přístroj je schematicky znázorněn na obrázku 15 [3].



Obr. 15: Schéma NPL interferometru pro kalibraci koncových měrek [3]

Po vyrobení prvního prototypu a detailním přezkoumání konstrukce v NPL byl přístroj a operační systém licencován firmou Tesa Metrology [4]. Laserový interferometr TESA NPL AGI 300 je používán ke kalibraci KM v Českém metrologickém institutu v Liberci.

2. 5 Český metrologický institut

Český metrologický institut (dále jen ČMI) je výkonným orgánem se sídlem v Brně, který zabezpečuje českou státní a primární etalonáž jednotek a stupnic fyzikálních technických veličin. Dělí se na 7 oblastních inspektorátů (Praha, Plzeň, České Budějovice, Liberec, Pardubice, Brno, Opava) a 4 pobočky (Most, Jihlava, Kroměříž, Olomouc), které zabezpečují sekundární etalonáže a výkon státní metrologické kontroly měřidel v rozsahu své působnosti. Dále ČMI provádí metrologický výzkum a uchovávání státních etalonů včetně přenosu hodnot měřících jednotek na měřidla nižších přesností a zaměřuje se na certifikaci referenčních materiálů. Provádí výkon státní metrologické kontroly měřidel, tj. schvalování typu a ověřování měřidel. Dále registruje subjekty, které vyrábějí nebo opravují stanovená měřidla, popřípadě provádějí jejich montáž. A provádí výkon státního metrologického dozoru u těchto subjektů a u uživatelů měřidel. V neposlední řadě se zaměřuje na metrologickou kontrolu hotově baleného zboží, poskytuje odborné služby v oblasti metrologie a může povolit předběžnou výrobu před schválením typu měřidla [1].

Ke kalibraci KM je v ČMI v Liberci používán laserový Interferometr TESA NPL AGI 300, na němž je zajišťována sekundární etalonáž délky pro Českou Republiku (dále jen ČR). Jsou na něm kalibrovány koncové měrky o rozměrech 0,3 mm až 300 mm s nejmenší nejistotou měření v ČR. Přístroj reprezentuje ČR v mezinárodních porovnáních organizovaných jak v rámci EURAMETu, tak i celosvětově.

Velikost nejistoty měření, která je pro ČMI uznána jako CMC (nejlepší kalibrační a měřicí schopnost laboratoře) je

$$U = \sqrt{20^2 + (0,2L)^2} \text{ nm},$$

kde L je jmenovitá délka koncové měrky udávaná v milimetrech.

Pomocí tohoto interferometru je také zajišťována kalibrace KM prvního řádu pro ČMI. Dále jsou na tomto stroji zajišťovány kalibrace koncových měrek pro zahraniční zákazníky, kteří požadují kalibrace měrek s nejvyšší přesností.

Interferometr měří na základě principu laserové interference s využitím dvou He-Ne stabilizovaných laserů, červeného o vlnové délce 633 nm a zeleného o vlnové délce 543 nm. Způsob kalibrace KM vychází z technické normy EN ISO 3650 a bude podrobněji popsán v následující kapitole 3.

3. Metodika povrchového šetření koncových měrek

Cílem diplomové práce bylo povrchové šetření KM, které poukáže na narušení povrchu při interferenční metodě kalibrace. Výsledné závěry z daného šetření poslouží ČMI jako podkladové materiály k vývoji nového zařízení pro bezkontaktní metodu kalibrace.

K detailnímu studiu povrchů z hlediska mikrostruktury a povrchového napětí KM před a po kalibraci interferenční metodou byly použity KM nejvyšší jakosti třídy K. Nejprve byla pro měření velikosti a smyslu zbytkových napětí v povrchové vrstvě KM použita metoda rentgenové tenzometrie. Jedná se o nedestruktivní metodu, využívající rozptylu (difrakce) svazku rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdálenosti atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím. Stanovené deformace polykrystalického materiálu jsou pak přepočteny na napětí pomocí vztahů teorie elasticity. Dále byla pro povrchové šetření použita metoda mikroskopie povrchu AFM (Atomic Force Microscopy – Mikroskopie atomových sil) využívající slabých meziatomových sil. V závislosti na uspořádání je tato metoda schopna detekovat rozdíly v chemickém složení nebo povrchový reliéf. Následně byla použita metoda optické mikroskopie, která umožňuje pozorovat a analyzovat netransparentní mikroskopické objekty a struktury v odraženém světle tisícinásobného zvětšení bez speciálních úprav mikroskopu a při běžné přípravě vzorků broušením a leštěním.

Šetření zbytkového napětí v povrchové vrstvě KM před i po kalibraci na interferometru bylo provedeno na rentgenovém zařízení X'Pert PRO v následujícím sledu:

- a) příprava měrek (odmaštění, ustavení do přípravku, označení měřené strany),
- b) rentgenová tenzometrie (zbytkové napětí v povrchu),
- c) ošetření měrek (lubrikant).

Detailní šetření povrchu bylo provedeno na AFM mikroskopu JPK NanoWizard 3 v režimu bezkontaktním. Pro optickou část byl použit světelný optický mikroskop Carl Zeiss AXIO IMAGER A2 v režimech DF. Měření bylo provedeno pomocí optické i atomární mikroskopie v co nejkratším čase vždy na jedné KM za sebou tak, aby se zabránilo zbytečnému vystavení citlivého povrchu měrky atmosférickým i dalším vlivům a zbytečnému dvojitému odmašťování a konzervaci. Šetření KM před i po kalibraci na interferometru reálně probíhalo v následujícím sledu:

- a) příprava měrek (odmaštění, ustavení do přípravku – souřadnice),
- b) optická mikroskopie (snímky povrchu na daných souřadnicích metodou DF),

- c) mikroskopie atomárních sil (snímání povrchu na daných souřadnicích, generování 3D modelů, měření drsnosti povrchu),
- d) ošetření měrek (lubrikant).

Dalším experimentem bylo zkoumání minimální síly potřebné pro nasunutí (nasátí) KM na základní rovinnou desku. U tohoto experimentu bylo zjišťováno, při jaké minimální síle dojde u jednotlivých jmenovitých délek KM ke správnému nasátí. Opakované pokusy nasátí a velikost síly potřebná pro nasátí KM mají vliv na opotřebení povrchu KM.

Jednotlivé úkony jsou níže podrobně rozepsány pro každou metodu měření zvlášť.

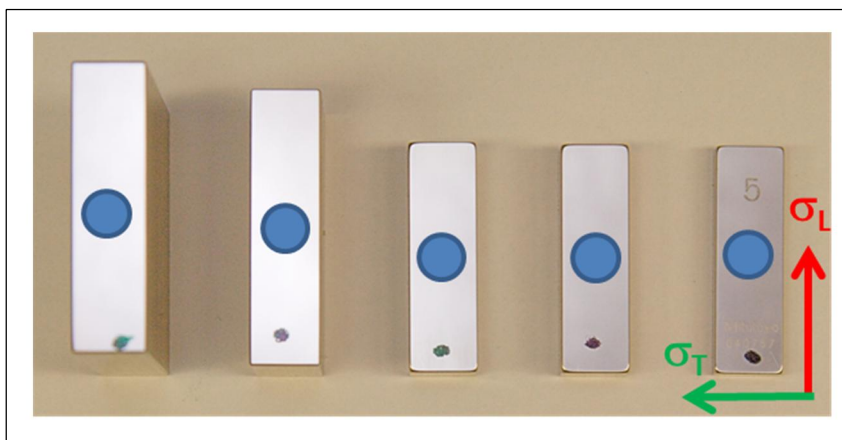
3. 1 Metodika šetření povrchového napětí koncových měrek pomocí rentgenové tenzometrie

Příprava měření

Měření bylo prováděno v čistém laboratorním prostředí za pokojové teploty (21°C). Bylo tak zajištěno, že výsledky šetření před a po kalibraci KM nebudou zkresleny vlivy při měření samotném.

Před každým měřením bylo třeba KM odmastit v lázni z izopropylalkoholu. Po opatrném vyjmutí (plastovou laboratorní pinzetou za úchopové strany) byly otřeny zbytky lubrikantu pomocí utěrky z hedvábného papíru. Poté byla KM znovu namočená izopropylalkoholem a vyleštěna hedvábným papírem.

Tenzometrická analýza těchto vzorků byla provedena ve všech případech vždy na jednom vybraném místě (středové oblasti), na straně označené tečkou (viz obr. 16). Hodnoty makroskopických zbytkových napětí byly analyzovány jak ve směru longitudinálním (L) tak i ve směru transversálním (T) (viz obr. 16).



Obr. 16: Umístění měřených oblastí (modrý kruh) na měřených vzorcích

Před zahájením vlastních měření zbytkových napětí metodou „ $\sin^2\psi$ “ byly z povrchu vzorků pořízeny difrakční obrazce na zpětný odraz. Spojitý homogenní charakter difrakční linie {211} α -Fe z analyzovaného povrchu svědčí kvalitativně o jemnozrnném izotropním polykrystalickém materiálu povrchové vrstvy o tloušťce cca 5 μm , která odpovídá efektivní hloubce vnikání použitého rtg záření do železných materiálů. V tomto případě je tedy aplikace „ $\sin^2\psi$ “ zcela korektní.

Postup měření

Měření bylo provedeno na difraktometru X'Pert PRO (viz obr. 17). Při rentgenografickém určení makroskopických zbytkových napětí metodou „ $\sin^2\psi$ “ byly u všech vzorků analyzovány roviny {211} α -Fe, kterým při použitém záření $\text{CrK}\alpha$ odpovídá difrakční maximum $2\theta \approx 156^\circ$. Difrakční profily byly změřeny při pěti náklonech vzorku odpovídajících kladným hodnotám úhlu ψ , pěti náklonech vzorku odpovídajících záporným hodnotám úhlu ψ a pro $\psi=0^\circ$. Pro přepočet deformací na napětí pomocí zobecněného Hookova zákona byly použity rentgenografické elastické konstanty $S_1 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$ a $\frac{1}{2}S_2 = 5,76 \text{ TPa}^{-1}$.

Dále byl ze získaných difrakčních dat vyhodnocen parametr FWHM (Full Width at Half maximum), tj. šířka difrakční linie {211} α -Fe v polovině její maximální intenzity. Experimentální chyba stanovení této veličiny nepřevyšuje $0,05^\circ 2\theta$.



Obr. 17: Difraktometr X'Pert PRO s polohovacími stoly

Parametry přístroje použitého k tenzometrickému experimentu pro měření vzorky byly následující:

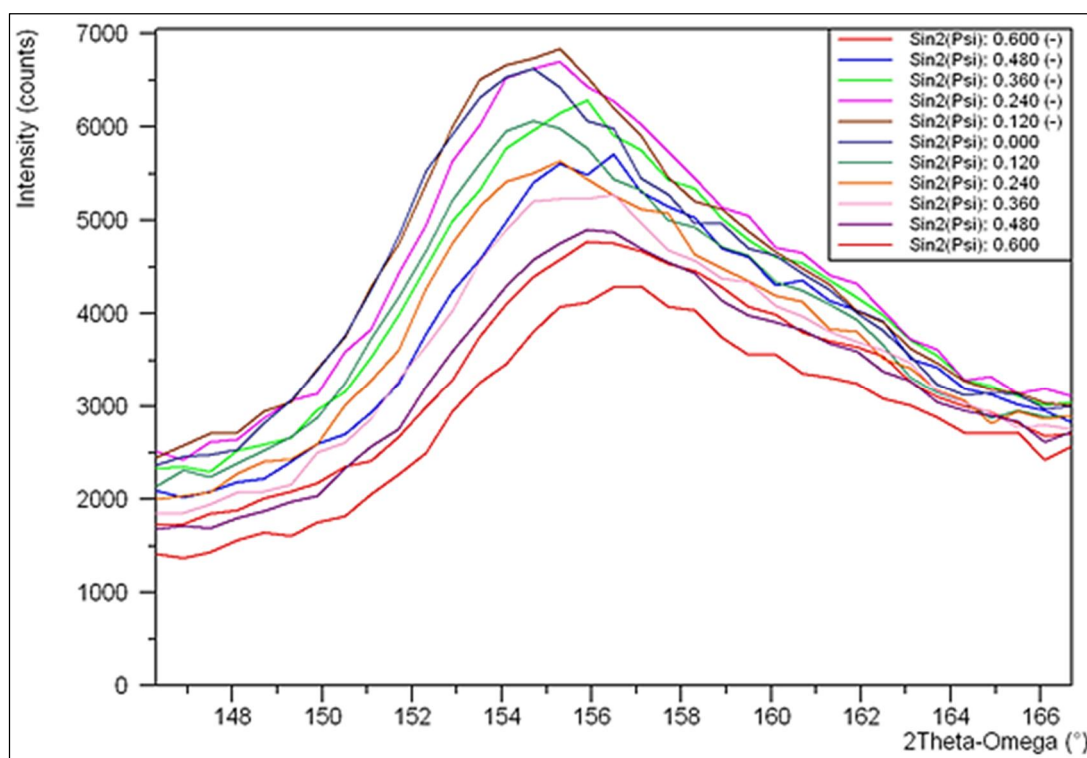
- $\theta - \theta$ difraktometr X'Pert PRO v Braggově-Brentanově semifokusační geometrii v uspořádání ω -goniometru,
- rentgenka s chromovou anodou,
- β filtr (absorbující difraktované záření $\text{CrK}\beta$) z tenké V fólie umístěný před proporcionálním detektorem,
- v dráze primárního svazku divergenční clona 1° a maska 10 mm,
- pro zachování konstantní plochy ozářeného povrchu byla použita Si maska, která v proměřovaném intervalu Braggových úhlů nedifraktuje, s kruhovým otvorem o průměru 6,5 mm. Ozářená oblast činila 33 mm^2 .

Pro polohování vzorků při měření na difraktometru bylo využito triangulačního laserového zaměřování s přesností určení polohy povrchu vůči zdroji laserového svazku $5 \mu\text{m}$.

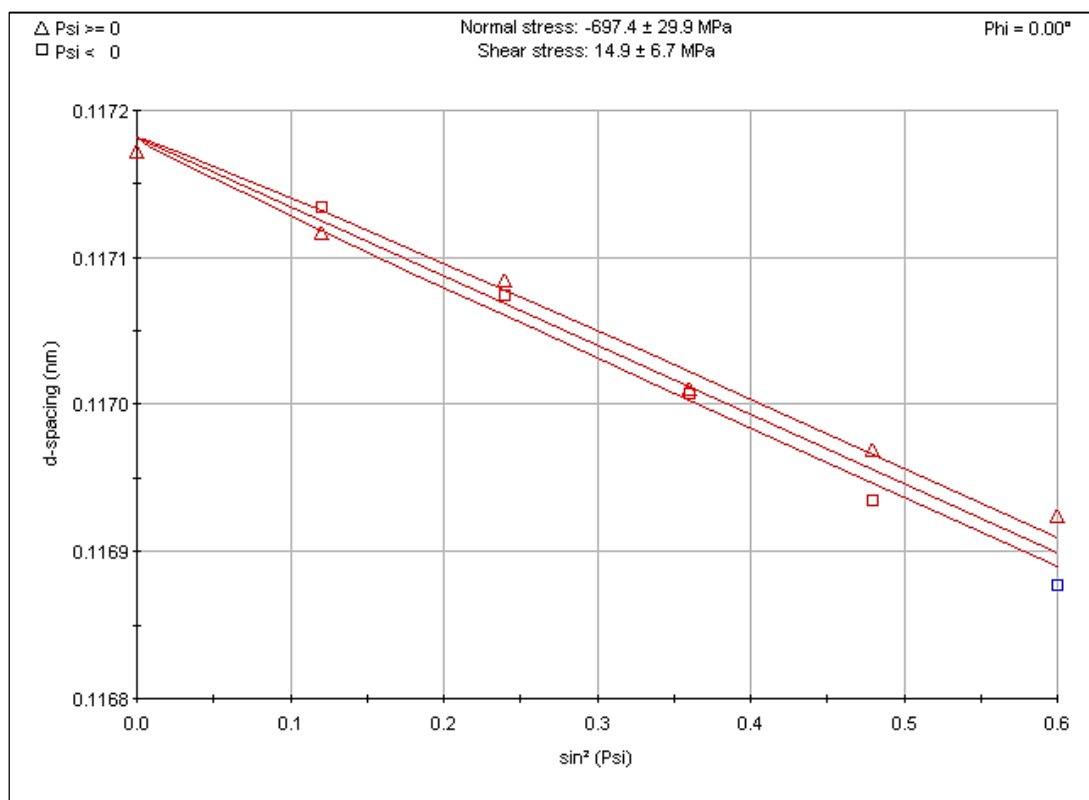
Výstup z měření

Použitím záření $\text{CrK}\alpha$, odpovídá difrakčnímu maximu rovin $\{211\}$ difrakční úhel $2\theta=156^\circ$. Difrakční maxima byla změřena vždy při jedenácti náklonech vzorku odpovídajících hodnotám $\sin^2\psi = 0; 0,12; 0,24; 0,36; 0,48; 0,6$ pro kladné i záporné hodnoty úhlu ψ (viz obr. 18).

V programu X'Pert Stress byly difrakční úhly určovány metodou těžiště (CoG - Center of Gravity), která určuje difrakční úhel z těžiště difrakčního dubletu $\text{K}\alpha$. Následně byly dle Braggovy rovnice vypočteny mezirovinné vzdálenosti d rovin $\{211\}$ $\alpha\text{-Fe}$. Pro přepočet deformací na napětí pomocí metody $\sin^2\psi$ byly z dostupné database vybrány rentgenografické elastické konstanty rovin $\{211\}$ $\alpha\text{-Fe}$ $S_1=-1,25 \text{ TPa}^{-1}$, $\frac{1}{2}S_2=5,76 \text{ TPa}^{-1}$. Ze směrnice lineární závislosti $d(\sin^2\psi)$ (viz obr. 19) byla pomocí těchto elastických konstant vypočítána napětí.



Obr. 18: Difrakční maxima rovin $\{211\}$ měřená při 11 hodnotách náklonu definovaného úhlem ψ

Obr. 19: Lineární závislost $d(\sin^2 \psi)$

Přístroje a zařízení při šetření povrchu pomocí optického mikroskopu:

- difraktometr X'Pert PRO,
- polohovací stolky,
- PC se softwarem X'Pert Stress.

3. 2 Metodika povrchového šetření koncových měrek pomocí optické mikroskopie

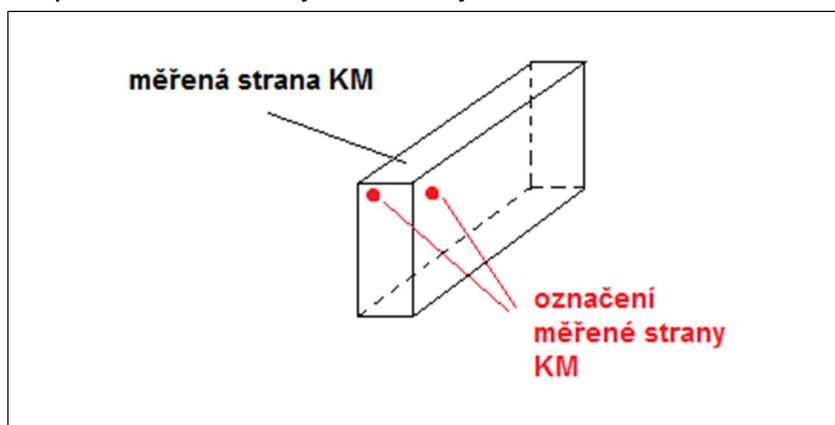
Příprava měření

Měření bylo prováděno v čistém laboratorním prostředí za pokojové teploty (21°C). Bylo tak zajištěno, že výsledky šetření před a po kalibraci KM nebudou zkresleny vlivy při měření samotném. Měrky byly měřeny jednotlivě každá zvlášť.

Před každým měřením bylo třeba KM odmastit v lázni z izopropylalkoholu. Po opatrném vyjmutí (plastovou laboratorní pinzetou za úchopové strany) byly otřeny zbytky lubrikantu pomocí utěrky z hedvábného papíru. Poté byla KM znovu namočená izopropylalkoholem ze stříčky, osušena horkým vzduchem a současně vyleštěna hedvábným papírem.

Postup měření

Připravená (odmaštěná a vyleštěná) KM byla upnuta do měřicího přípravku, jímž je speciální upínací stolek pro korelativní mikroskopii s mikrometrickými šrouby (viz obr. 21). Tyto šrouby zajišťují pohyb stolku v přesně definovaných drahách. Pro upnutí byla měřená strana označena na úchopových plochách KM tečkami tak, aby nemohlo dojít k záměně měřené funkční plochy a orientace v měřicím přípravku (viz obr. 20). Označení bylo třeba provést pomocí lakového popisovače na kovy, který odolává izopropylalkoholu i jiným běžným rozpouštědlům. Vzorek byl do stolku upevněn označenou stranou vzhůru. Na další přístroje (AFM, SEM) je umisťován přímo celý stolek, aniž by bylo potřeba vzorek znovu ustavovat. Bylo třeba zaznamenávat souřadnice, na nichž je prováděno měření a měřit stejná místa před i po kalibraci. Tento postup opakovaného měření je velmi náročný na přesnost a zde je umožněn jen díky charakteru používaných KM se stálými a přesně definovanými rozměry.



Obr. 20: Způsob označení měřené strany koncové měrky na úchopových plochách

Snímky povrchu byly pořizovány pomocí přímého optického mikroskopu s odraženým světlem Zeiss Axio Imager A2 (viz obr. 21) v režimu DF (tmavé pole). V tomto režimu vystupují škrábance a další nedokonalosti povrchu jako bílé čáry nebo body v černém podkladu (viz obr. 22).

Nejprve byly v režimu BF pořizovány snímky v malých zvětšeních 25x a 50x, tyto snímky slouží především pro náhled na rozsáhlejší plochu povrchu a k zaměření na její nejpoškozenější části. Ty byly následně nasnímány ještě ve zvětšeních 500x a 1000x a to v režimu DF. Zároveň byly zaznamenávány souřadnice těchto míst, které byly pak snímány po kalibraci KM, aby mohly být výsledky vzájemně porovnány. U výraznějších poškození se při akvizici snímků používá tzv. Z-Stack, kdy software automaticky proostřuje a pořizuje snímky v ose z a výsledný obraz pak skládá z několika desítek snímků. Je tak zajištěna vysoká kvalita a ostrost pořizovaných snímků.



Obr. 21: Optický mikroskop Carl Zeiss Axio Imager A2 se stolem pro korelativní mikroskopii

Výstup z měření

Snímky z optického mikroskopu byly určeny pro kvalitativní hodnocení stavu povrchu KM. Byly hledány a hodnoceny škrábance, důlky a výstupky na povrchu – jejich četnost, intenzita apod. U výrazně poškozených oblastí byla zaznamenána jejich poloha (souřadnice), aby bylo možno přenést tyto souřadnice do AFM a také porovnat stav povrchu před a po kalibraci. Pro přenos snímků byla použita CCD kamera Zeiss AxioCam ICc 1, a pro následné zpracování PC se softwarem Axio Vision 4.8. Snímky byly v posledním kroku uloženy ve formátu .tif.

Po skončení měření byla KM upnutá do měřicího přípravku přenesena i s přípravkem (speciálním stolem) na pracovní stůl mikroskopu AFM.



Obr. 22: Snímek povrchu koncové měrky v režimu DF – zvětšeno 500x

Přístroje a zařízení při šetření povrchu pomocí optického mikroskopu:

- měřicí přípravek – upínací stolek pro korelativní mikroskopii,
- světelný optický mikroskop s odraženým světlem – Carl Zeiss Axio Imager A2,
- PC, CCD kamera Zeiss AxioCam ICc 1, software Axio Vision 4.8 pro přenos a zpracování obrazu.

3. 3 Metodika povrchového šetření koncových měrek pomocí mikroskopu AFM

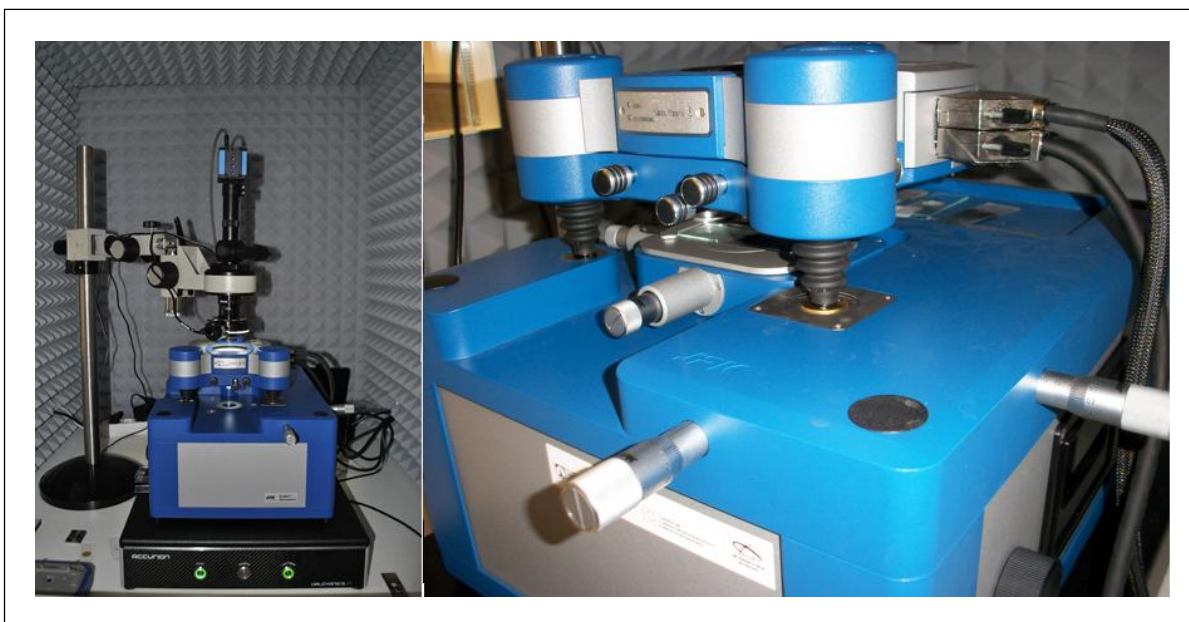
Příprava měření

Měření bylo prováděno v čistém laboratorním prostředí za pokojové teploty (21°C). Bylo tak zajištěno, že výsledky šetření před a po kalibraci KM nebudou zkresleny vlivy při měření samotném.

Připravená (odmaštěná a vyleštěná) KM byla upnuta do speciálního stolku s mikrometrickými šrouby během předchozího měření na optickém mikroskopu. Stolek byl následně umístěn do pracovního stolu (BioMAT Workstation). Poté následovalo usazení skenovací hlavy SPM JPK NanoWizard 3 na pracovní stůl (viz obr. 23). Po usazení hlavy SPM byly pomocí mikrometrických šroubů nastaveny souřadnice, na kterých byly provedeny skeny. Tyto souřadnice byly dány předešlými měřeními na dané KM.

Postup měření

Snímky povrchů KM byly vyhotoveny prostřednictvím skenovací hlavy SPM v zapojení mikroskopie atomárních sil (AFM) a v bezkontaktním režimu (non-contact mode), kdy se cantilever (skenovací sonda) pohyboval v těsné blízkosti povrchu. Na cantilever působí přitažlivé síly atomů nacházejících se na povrchu. Na každé KM byly provedeny vždy dva skeny a to v rozsazích $50 \times 50 \mu\text{m}$ a $10 \times 10 \mu\text{m}$. Nasnímaná data byla softwarem JPK Data Desktop uložena k následnému zpracování (měření výšky profilů, vygenerování 3D modelu a výpočet drsnosti povrchu).



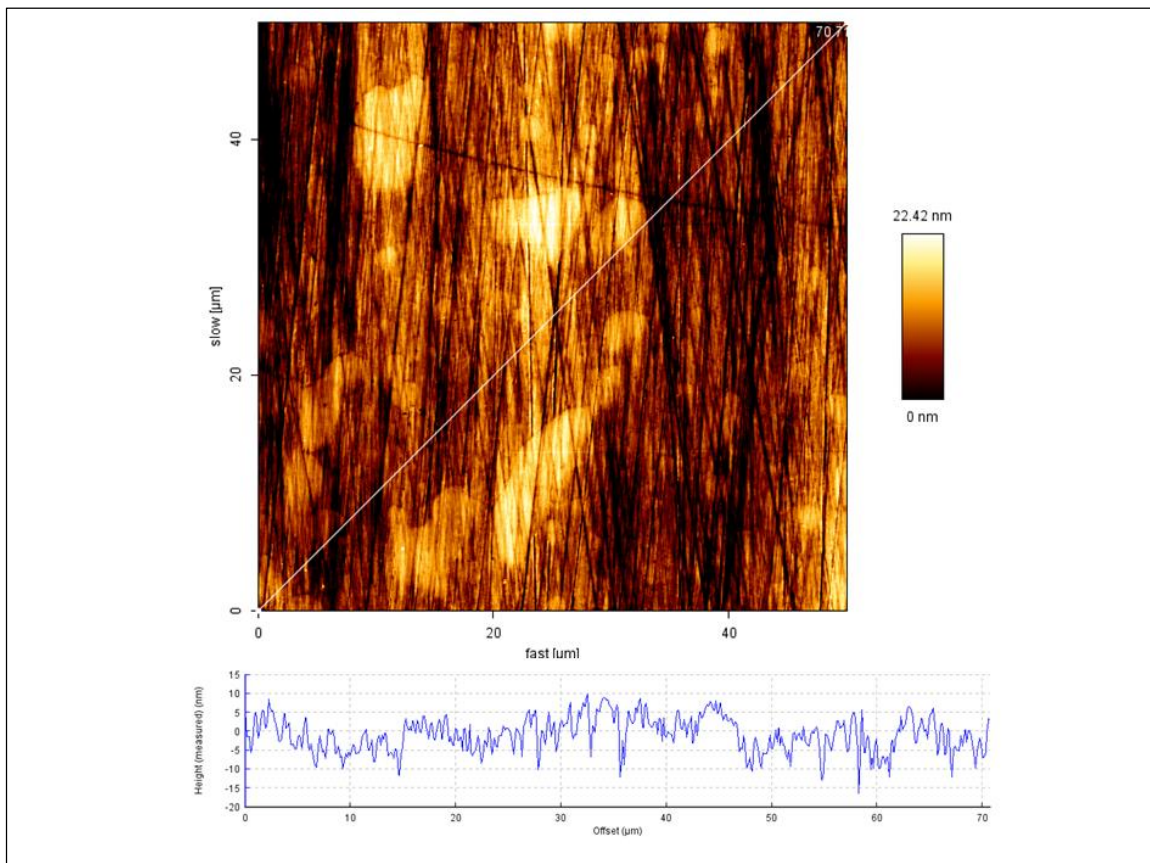
Obr. 23: SPM JPK Nano Wizard 3 s pracovní stanicí BioMAT, zařízením Top View pro přenos obrazu a se stolem pro korelativní mikroskopii

Výstup z měření

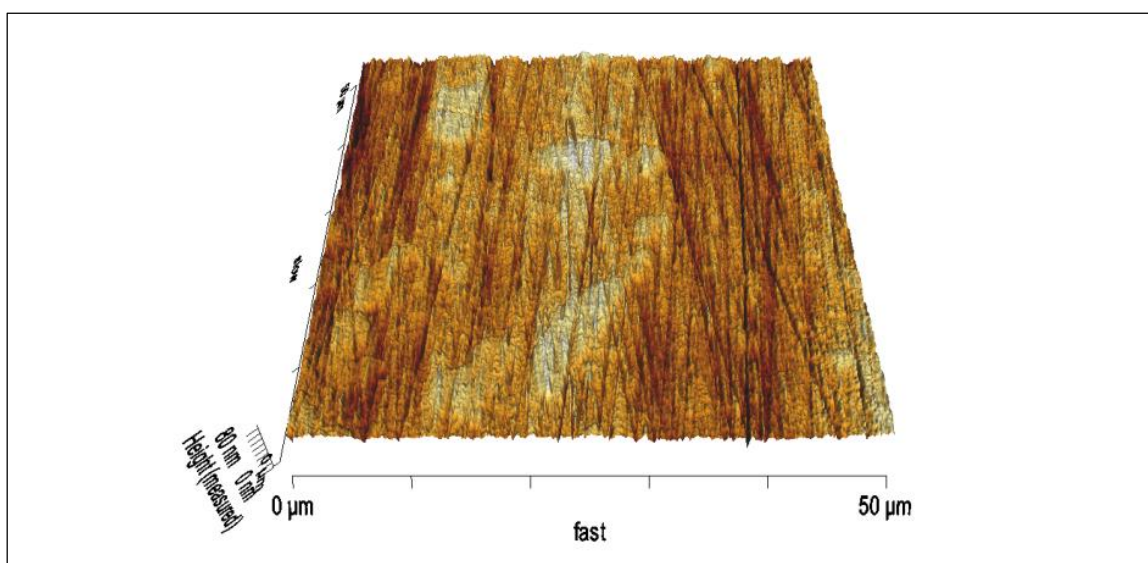
Snímky z mikroskopu atomárních sil byly určeny pro podrobné hodnocení struktury povrchu KM. Místa určená ke skenování mikroskopem atomárních sil vycházely z předchozího šetření mikroskopem optickým. Na zadaných souřadnicích (získaných pomocí LOM) byly provedeny skeny povrchu v požadovaných rozsazích. Skeny povrchu byly provedeny na stejných souřadnicích před i po kalibraci, aby bylo možno vzájemně porovnat výsledky a definovat tak intenzitu případného poškození způsobeného kalibrací.

Uložená data byla zpracována v programu JPK Data Processing. Po otevření skenu bylo třeba provést korekci obrazu. Tento krok se provádí zejména kvůli odstranění vnějších vlivů, jako jsou akustické a mechanické vibrace z okolního prostředí. Následovalo vygenerování topografie povrchu v 2D (obr. 23) a 3D (obr. 24) obrazech. Měření drsnosti povrchu bylo pak provedeno výpočtovým mechanismem (Profile Measurement) implementovaným v programu JPK Data Processing. Jako vstup pro tento výpočet bylo nutné stanovit dráhu, ve které byl

tento výpočet prováděn. Po výpočtu byl vygenerován graf znázorňující profil (viz obr. 23), ze kterého byla drsnost vypočtena a dále vygenerována samotná tabulka drsností. Všechna vygenerovaná data byla v posledním kroku uložena jako obrázky ve formátu .tif.



Obr. 23: Snímek 2D topografie povrchu koncové měrky spolu s měřením drsnosti povrchu v měřícím rozsahu 50 x 50 μm



Obr. 24: Snímek 3D topografie povrchu koncové měrky v měřícím rozsahu 50x50 μm

Po skončení měření byla KM šetrně vyjmuta z měřicího přípravku a na její povrch byl bezkontaktně (sprejem) nanesen lubrikant. Měrka byla znovu opatřena původním obalem.

Přístroje a zařízení při šetření povrchu pomocí mikroskopu AFM:

- měřící přípravek – upínací stolek pro korelativní mikroskopii,
- SPM snímací hlava JPK NanoWizard 3,
- Zařízení Top View + CCD kamera IMAGINGSOURCE DFK 31AF03 pro náhled na vzorek,
- BioMAT Workstation pracovní stůl pro umístění vzorků a SPM snímací hlavy,
- Cantilevery NANOSENSORS CPPP-NCHAuD-30, s přitlačnou silou 10-130 Nm, výška hrotu 10-15 μm ,
- PC, software JPK Data Processing pro zpracování obrazu, JPK SPM Desktop pro snímání povrchu.

3. 4 Metodika kalibrace koncových měrek na interferometru TESA NPL v ČMI OI v Liberci

Vstupními hodnotami pro vlastní měření jsou teplota vzduchu, teplota KM a teplota základní desky, barometrický tlak, vlhkost vzduchu a obsah CO_2 ve vzduchu. Tyto hodnoty jsou měřené během kalibrace pomocí čidel a slouží k výpočtu korekcí vzhledem k požadovaným referenčním podmínkám měření a pro výpočet indexu lomu vzduchu v místě měření. Dále je třeba znát nominální délku KM a kalibrovanou hodnotu vlnových délek laseru ve vakuu. Tyto hodnoty se zadávají do softwaru.



Obr. 25: Pracoviště s interferometrem TESA NPL AGI 300

Příprava měření

Před zahájením měření bylo třeba učinit několik kroků. Hlavním požadavkem na měřicí plochy KM je, že musí být schopny přilnout působením molekulárních sil k jiným měřicím plochám nebo na plochy se stejnou úpravou povrchu.

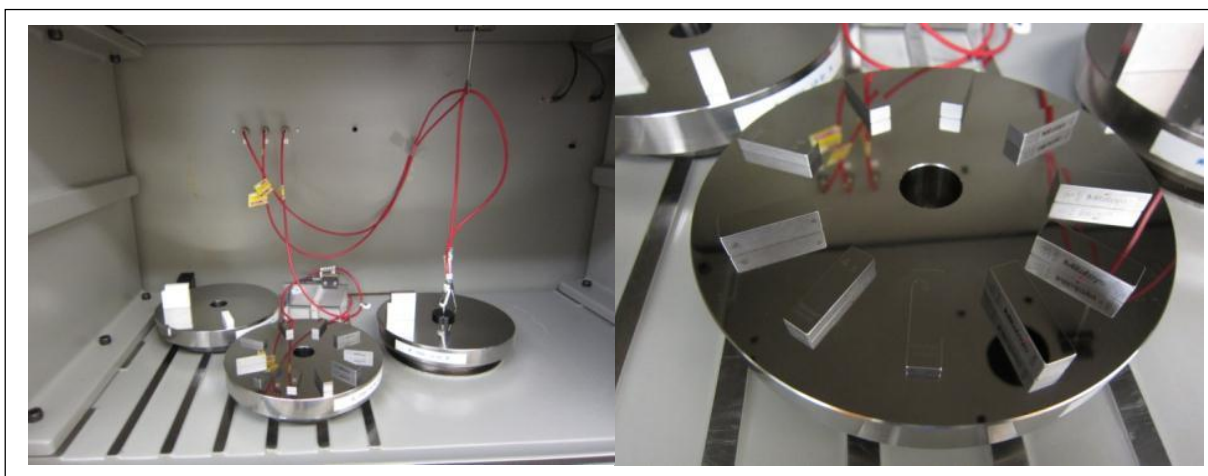
Veškerá manipulace s měrkami byla prováděna ve speciálních laboratorních rukavicích, které zároveň minimalizují teplotní ovlivnění KM, a s pomocí speciálních kleštíček na KM.

Před měřením byly měrky důkladně odmaštěny (lázeň z izopropylalkoholu) a očištěny. Poté byly umístěny v laboratoři o stálé teplotě 20 °C a relativní vlhkosti max. 50 % nejméně 24 hodin pro dosažení jejich teplotní rovnováhy s okolím. Následně byly měrky přilnuty nasunutím na základní ocelovou rovinnou desku, jejíž povrch je lapován tak, aby úchylka rovinnosti jakékoli její plochy o velikosti (40 x 40) mm byla maximálně 25 nm. Tloušťka základních desek nesmí být menší než 11 mm. Rovinná deska byla před použitím omyta lékařským benzínem, poté čistým lihem a vyleštěna optickou utěrkou.

Při umísťování KM bylo na desku nanášeno malé množství (kapka) speciální jemné kapaliny, která usnadňuje přilnutí KM (používá se zejména pro ocelové KM, pro měrky z tvrdokovu není nutné použít), poté byl povrch opět vyleštěn optickou utěrkou a byly nasouvány měrky.

Umísťovaná měrka byla vždy položena na okraj desky první lapovanou plochou a se stálým přítlakem kolmo k druhé lapované ploše byla posouvána do požadované pozice tak, aby byla přilnuta k desce a nebylo možné ji oddělit nadzdvihnutím, ale pouze posunutím. Tím byla zároveň vytlačována pomocná kapalina, jejíž zbytky se poté vypařily.

Na základní desku lze teoreticky umístit maximálně 12 koncových měrek, obvykle se podaří osm až deset. Na následujícím obrázku 26 je vidět základní deska s deseti nasátými KM.



Obr. 26: Základní deska s nasátými koncovými měrkami

Postup měření

Základním měřeným parametrem je středová délka koncové měrky l_c (viz obr. 5 na str. 13), resp. úchylka středové délky od jmenovité hodnoty. Dále může být měřena úchylka rovinnosti f_d (viz obr. 6 na str. 14) obou měřicích ploch (levé i pravé, také označovaných A a B) a také vyhodnoceno rozpětí délky.

Deska s nasátými měrkami byla přenesena do místa měření, což byla uzavřená komora (viz obr. 27). Tato komora obsahuje čidla odporových teploměrů pro měření teploty vzduchu, základní desky a KM, dále čidla vlhkoměru a tlakoměru, případně i čidla pro měření obsahu CO_2 ve vzduchu. Hodnoty naměřené čidly slouží jednak k výpočtu korekcí vzhledem k požadovaným referenčním podmínkám měření a také pro výpočet indexu lomu vzduchu v místě měření.

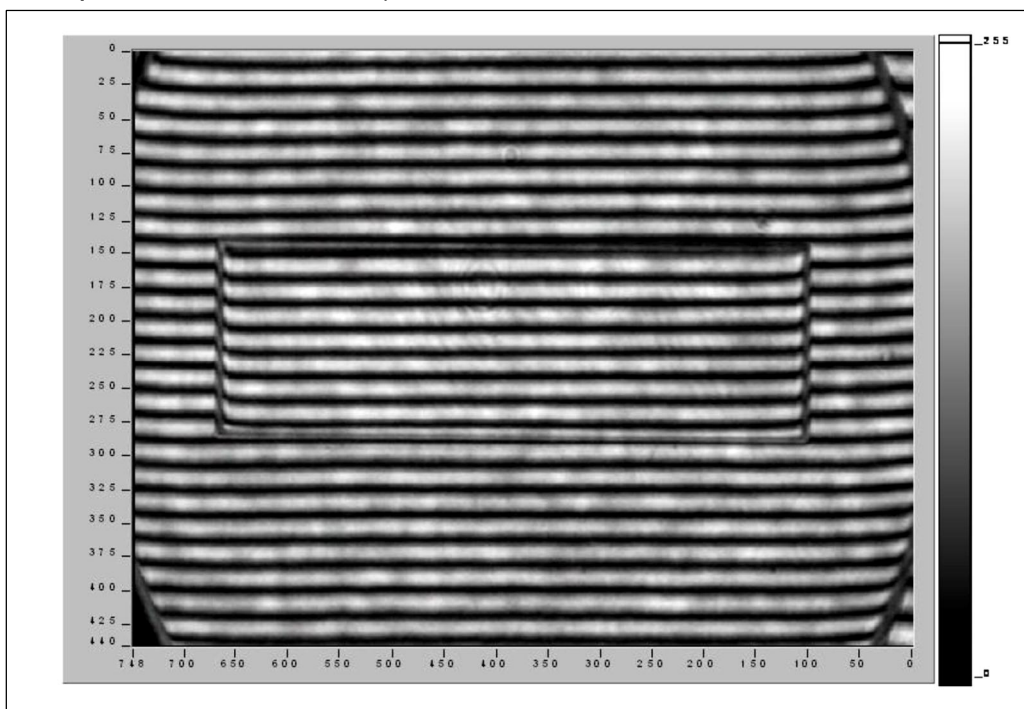


Obr. 27: Měřicí komora pro měření koncových měrek

V oddělené části komory je umístěna optická část interferometru včetně kamery, která snímá interferenční obraz povrchu KM a základní desky. Optika je zaměřena na jedno měřicí místo, kde snímá povrch o průměru cca 50 mm, přičemž základní desku přístroj umí natáčet tak, aby bylo možné ustavení jednotlivých měrek vždy do správné pozice pro měření.

Po umístění desky s měrkami do měřicí komory byla komora uzavřena a byl předběžně zkontrolován interferenční obraz jednotlivých přilnutých měrek. Základní deskou bylo postupně otáčeno, aby byla vždy jedna měrka v místě snímání optiky. Povrch měrky a desky, včetně interferenčního obrazce, byl snímán pomocí kamery a zobrazován na monitoru počítače, na kterém v danou dobu běží měřicí software přístroje. Na monitoru bylo tedy možné pozorovat interferenční proužky, které jsou v požadovaném případě rovné a rovnoběžné (viz obr. 28).

Pokud jsou interferenční proužky výrazněji zakřivené, znamená to, že KM není na desce správně přilnuta nebo je poškozena. V případě špatného přilnutí měrka není měřena a je nutné ji na základní desku znovu umístit. Takto byly zkontrolovány všechny měrky. Následně jsou do měřicího softwaru vloženy potřebné údaje o kalibrovaných KM (nominální rozměry, výrobce, materiál, koeficient lineární délkové teplotní roztažnosti atd.).



Obr. 28: Interferenční obrazec při měření délky koncové měrky [12]

Poté byly měrky několik hodin teplotně stabilizovány. Před měřením byly zapnuty lasery (viz obr. 29), které musí být frekvenčně stabilizovány, a uzamčeny. Měření bylo poté vykonáváno dle nastavení programu, přičemž měření probíhalo při stabilizované teplotě $20\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$. Kalibrovaná měrka byla natočena do místa měření, bylo přepnuto na červený laser, pomocí potenciometrů byla seřízena optika tak, aby proužky byly v požadované poloze a hustotě a následně byl skenován povrch měrky. Zároveň byly měřeny teploty, tlak a vlhkost. Poté bylo přepnuto na zelený laser, opět byla seřízena poloha a hustota interferenčních proužků a opět bylo provedeno měření.



Obr. 29: Červený a zelený laser

Výstup z měření

Za pomoci měřicího softwaru byly provedeny výpočty, vyhodnocen index lomu vzduchu, spočítána úchylka středové délky a rovinnosti se započítáním korekcí k referenční teplotě měření. Dále byl určen rozdíl hodnot naměřených červeným a zeleným laserem, který je v ideálním případě nulový.

Stejným způsobem byly měřeny všechny měrky v sadě. Nejprve na straně A, poté na straně B. Celá sada bývá obvykle měřena na stejné základní desce. Požadovaným stavem je, aby hodnoty úchylek středové délky měřených na straně A a na straně B nebyly příliš rozdílné. Pokud jsou měřeny měrky třídy přesnosti K v perfektním stavu, jsou rozdíly obvykle max. do 5 nm. U KM nižších tříd přesnosti, s vyšším opotřebením měřicích ploch apod., mohou být rozdíly mnohem vyšší.

Po odrazu světla laseru od zrcadlové plochy KM dochází ke ztrátě části jeho fáze a hodnoty úchylek středové délky je nutné korigovat. Pro zjištění korekce fáze byly vybrány čtyři KM, které byly spolehlivě nasáty na základní desku na straně A i B, hodnoty jejich naměřených úchylek byly během měření stabilní a vykazovaly minimální rozdíly mezi stranou A a B. Tyto měrky byly poté vzájemně nasunuty na sebe a byl vytvořen sloupec, který byl nasát na základní rovinnou desku. Ten byl následně měřen stejně, jako by se jednalo o jedinou měrku, byly zachovány všechny postupy měření a měření bylo provedeno opět z obou stran. Z hodnot naměřených tímto způsobem a naměřených hodnot úchylek jednotlivých měrek z předchozích měření byla poté vypočítána tzv. korekce fáze laseru podle vzorce:

$$\Delta l_{\varphi} = \frac{O_c - O_i}{N - 1},$$

kde:

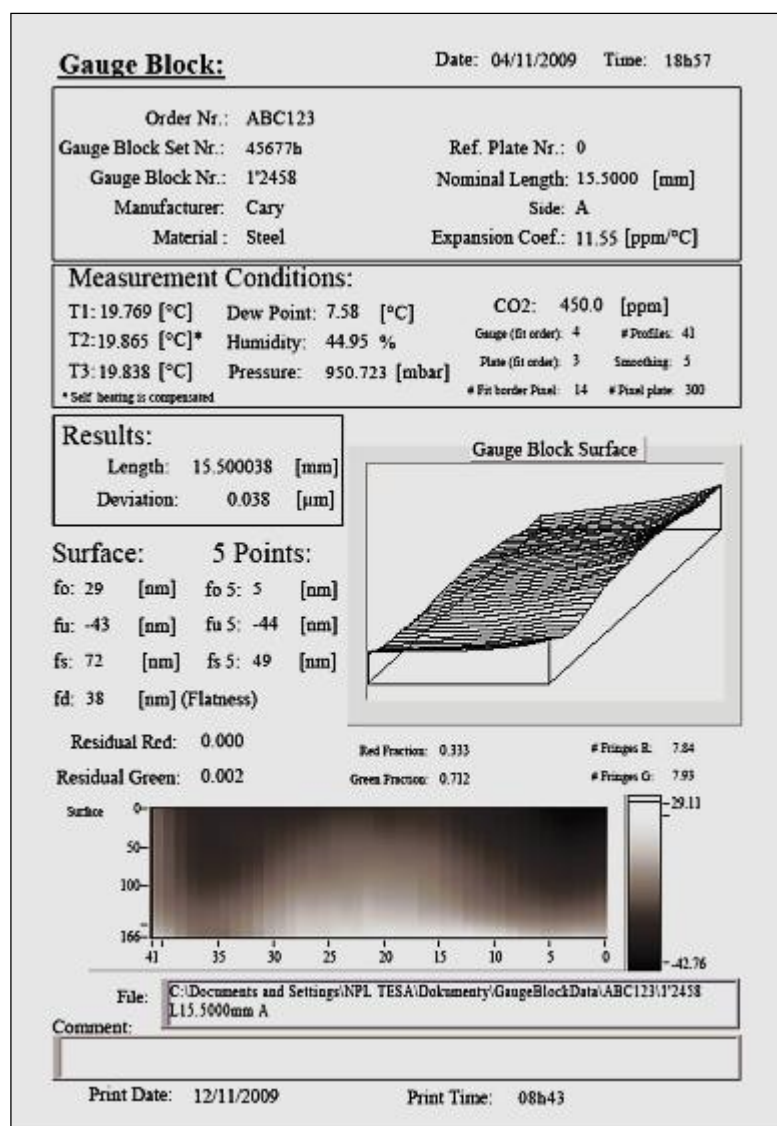
O_c : odchylna středové délky sloupce KM,

O_i : součet odchylek středové délky jednotlivých KM,

N: počet KM tvořících sloupec.

Tato hodnota byla poté přičtena ke všem naměřeným hodnotám úchylek středové délky jednotlivých kalibrovaných KM.

Výstupem je protokol z měření (viz obr. 30) pro každou měřenou stranu KM, který je možné vytisknout.



Obr. 30: Výsledek měření jedné strany koncové měrky

Přístroje a zařízení pro kalibraci koncových měrek:

- interferometr TESA NPL AGI 300,
- ocelová základní deska,
- PC se softwarem LabVIEW 8.6.

3. 5 Metodika šetření minimální velikosti síly potřebné pro správné nasátí koncových měrek**Příprava měření**

Měření bylo prováděno v laboratoři Katedry obrábění a montáže za laboratorní teploty (20°C), kde byly měrky ponechány 24h pro dosažení jejich teplotní rovnováhy s okolím. Bylo tak zajištěno, že výsledky nebudou zkresleny teplotními vlivy.

Veškerá manipulace s měrkami byla prováděna ve speciálních laboratorních rukavicích. KM byla vyjmuta z obalu, odmaštěna lékařským benzínem a vyleštěna optickou utěrkou. Pro nasouvání (nasátí) měrky byla použita skleněná referenční deska, aby bylo možno nasátý povrch pozorovat přes průhlednou skleněnou plochu. Referenční deska byla před použitím rovněž omyta lékařským benzínem a poté vyleštěna optickou utěrkou.

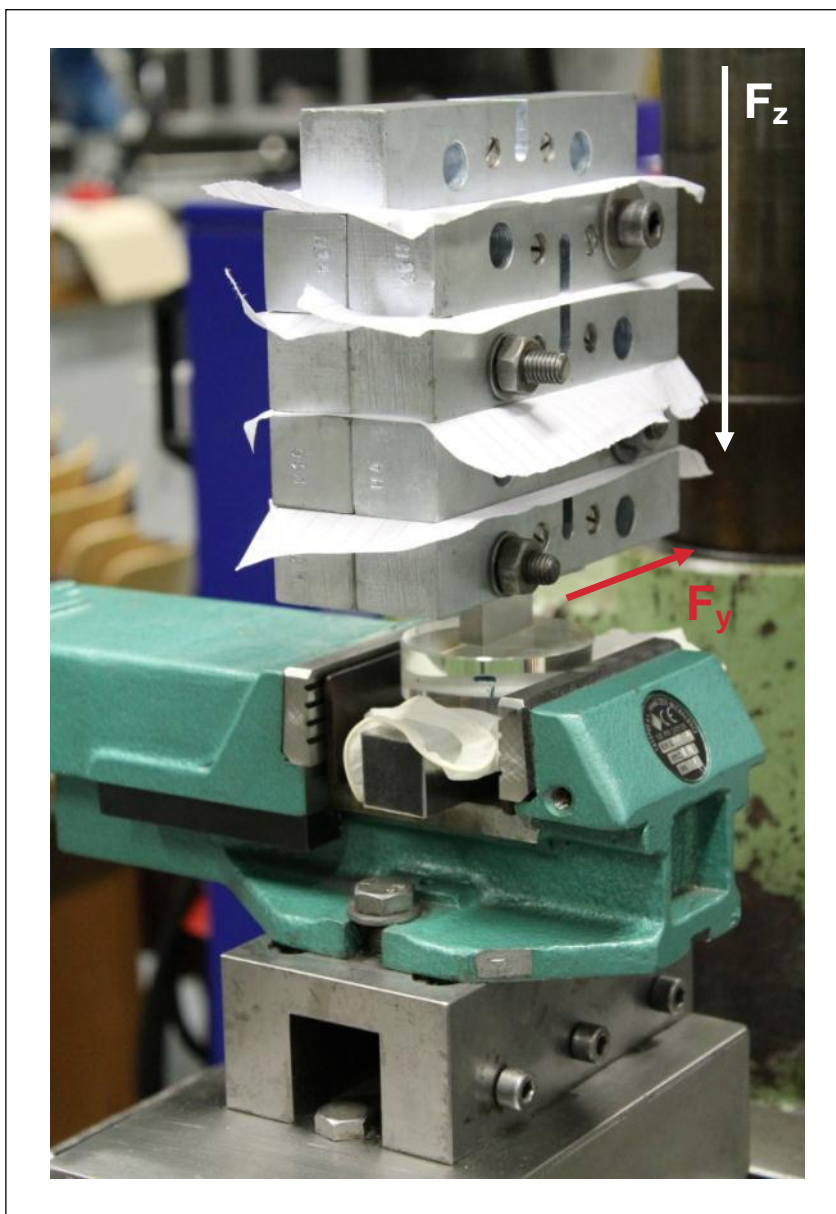
Přítlačná síla byla měřena pomocí dynamometru KISTLER se softwarem LabVIEW. Dynamometr KISTLER byl nastaven tak, aby měřil účinky sil ve třech osách (F_x , F_y , F_z). Pro nás byly důležité síly F_z (síla zatížení měrky) a F_y (síla posuvu měrky), jak je vidět na obrázku 31. Ověření kalibrace dynamometru KISTLER v ose „z“ bylo provedeno zatížením snímače pomocí ocelového závaží, u něhož byla známa hmotnost (7,8 kg). Naměřená hodnota se pohybovala kolem 78 N a nepřesáhla tolerovanou odchylku 5%. Tím bylo zjištěno, že dynamometr měřil správně.

Pro šetření správného nasátí KM byly použity síly od 10 do 90 N odstupňované po 10 N. Těchto sil bylo docíleno kalibrovanými závažími od 1 do 9 kg. Měření síly bylo nastaveno na dobu snímání 20 vteřin od počátku působení sil na měrku.

Postup měření

Referenční deska byla upnuta do svěráku umístěného na dynamometru a podložena pryží, aby nedošlo k jejímu poškození. Měřená KM byla vždy položena k okraji desky lapovanou plochou a zatížena závažím, aby bylo docíleno požadované síly. Mezi závaží a měrku byl umístěn papírek zabraňující poškození lapované plochy měrky. Následně bylo měrkou ručně posunuto přes plochu referenční desky k jejímu protilehlému okraji, aby byla přilnuta k desce (viz obr. 31). Při tomto nasouvání byla síla zatížení i síla posuvu měřena dynamometrem.

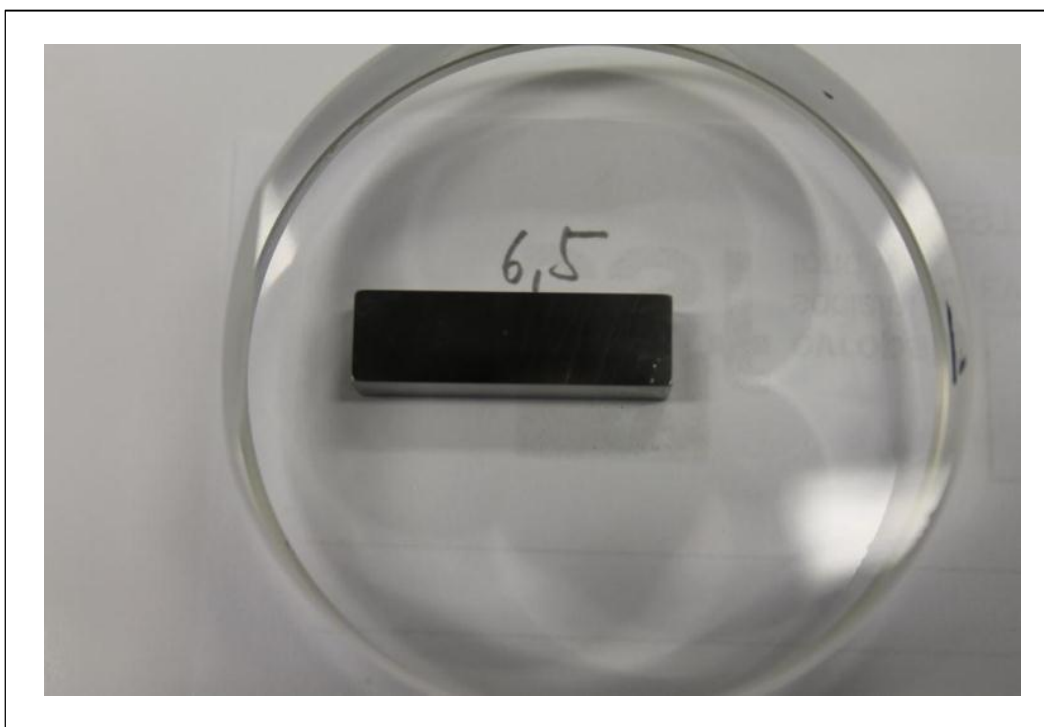
Poté bylo z KM opatrně odstraněno závaží a referenční deska s měrkou byla vyjmuta ze svěráku pro kontrolu správného nasátí.



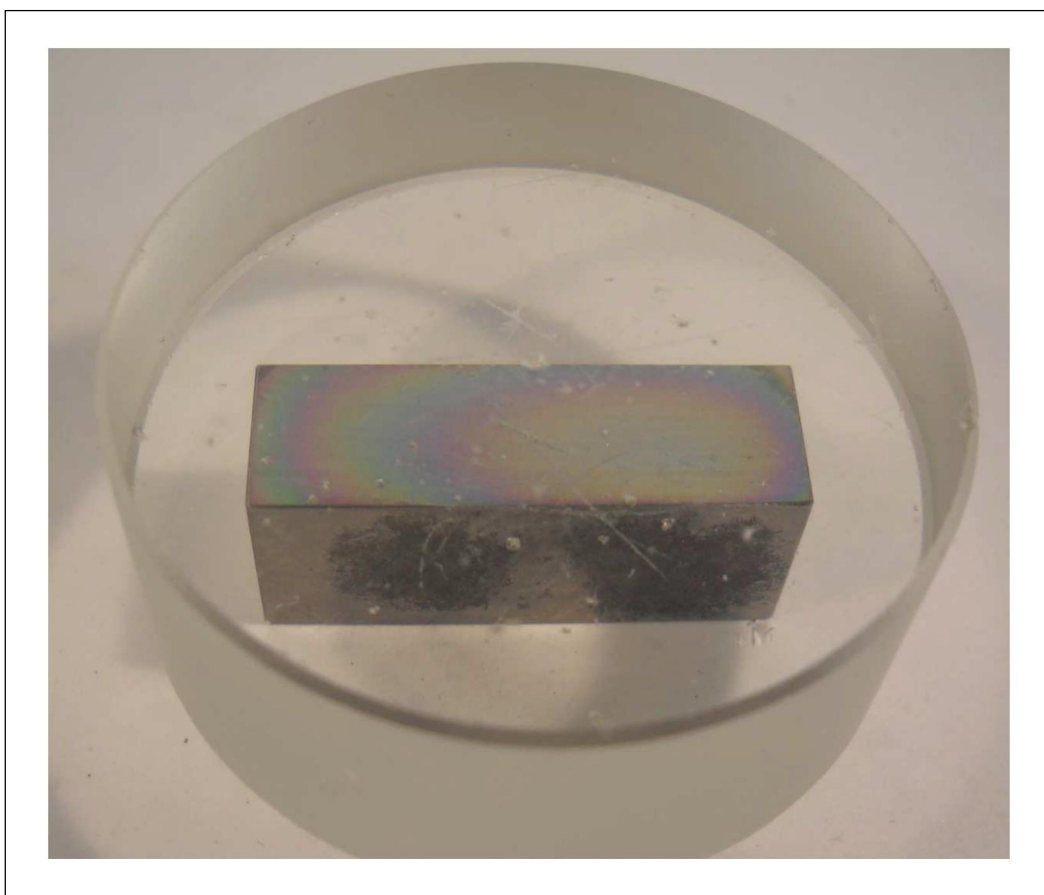
Obr. 31: Koncová měrka zatížená silou 90N nasáta na skleněné referenční desce

Výstup z měření

Po každém měření bylo kontrolováno správné nasátí KM nejprve ručně, zda KM drží na základní desce a nelze ji oddělit nadzdvihnutím, následně opticky na rozhraní mezi plochou skla a KM. Rozhraní, pokud je KM správně nasáta, by mělo být homogenní šedé barvy (viz obr. 32). Jakékoliv světlejší nebo barevné odlišení označuje špatný kontakt způsobený špatným nasátím (viz obr. 33).

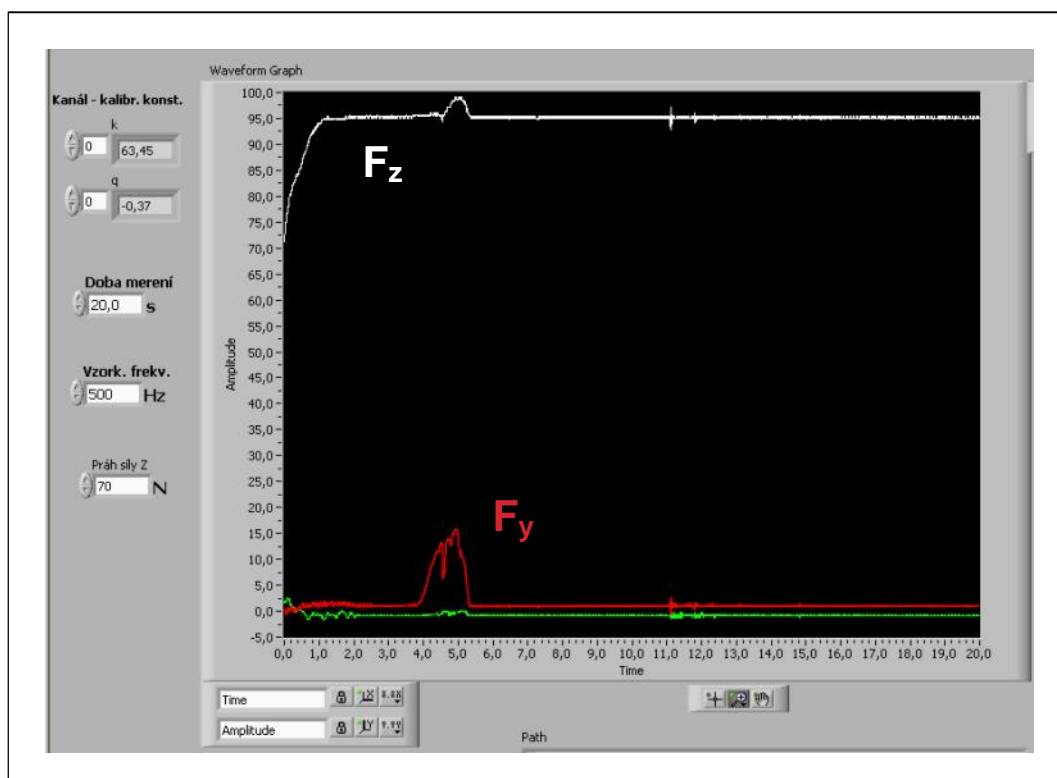


Obr. 32: Rozhraní mezi plochou skla a plochou koncové měrky při správném nasátí



Obr. 33: Rozhraní mezi plochou skla a plochou koncové měrky při špatném nasátí

Dynamometr zaznamenával naměřené síly do grafu. Síla zatížení měrky v ose „z“ byla vyhodnocována jako bílá a představovala ji složka F_z . Síla posuvu měrky v ose „y“ byla vyhodnocována jako červená a představovala ji složka F_y . Průběhy těchto sil a jejich barevné označení jsou znázorněny na obrázku 34. Grafy s průběhy těchto sil byly určeny pro kontrolu síly zatížení měrky F_z a pro informaci o velikosti síly posunutí měrky F_y . Po každém odměření následovalo uložení grafu s naměřenými silami do příslušné složky.



Obr. 34: Průběhy sil a jejich barevné znázornění při nasátí koncové měrky

Po skončení měření byla KM ošetřena lubrikantem (lékařská vazelína) a opatřena původním obalem.

Přístroje a zařízení pro šetření minimální velikosti síly potřebné pro nasátí koncových měrek:

- dynamometr KISTLER se softwarem LabVIEW,
- závaží pro kalibraci dynamometru o hmotnosti 7,8 kg,
- kalibrovaná závaží o hmotnosti od 1 do 9 kg,
- skleněná referenční deska.

4. Experimentální část

4. 1 Sledované parametry

V rámci povrchového šetření KM při interferenční metodě kalibrace byly sledovány následující parametry:

- a) u rentgenové tenzometrie bylo vyhodnocováno zbytkové napětí v povrchu KM, jeho smysl a velikost,
- b) u optické mikroskopie byly vyhodnocovány snímky povrchu KM ve zvětšení 500x a 1000x v režimu DF,
- c) u AFM byly vyhodnocovány parametry drsnosti povrchu KM R_a , R_q , a R_t , včetně 2D a 3D skenů struktury povrchu,
- d) u šetření minimální potřebné síly bylo zkoumáno správné nasátí jednotlivých KM při různých velikostech sil.

Pro objektivní zhodnocení kvality zkoumaných povrchů KM bylo realizováno měření metodou rentgenové tenzometrie a měření drsnosti metodou AFM včetně záznamů z optické mikroskopie před vlastní kalibrací a následně po kalibraci na interferometru. Dále byla měřena minimální síla pro správné nasátí KM. Zkoumání povrchů KM před a po kalibraci bylo realizováno při stejných podmínkách a u stejných KM příslušné jmenovité délky. K detailnímu studiu byly použity KM nejvyšší jakosti třídy K. Pro objektivní zhodnocení povrchového šetření KM bylo měření provedeno na pěti sadách KM, z nichž byly vybrány měrky vždy stejné jmenovité délky 5; 8; 10; 25; 50 mm pro rentgenovou tenzometrii. KM jmenovité délky 0,5; 1; 1,5; 2; 5; 6; 7; 8; 10; 10,5 mm pro AFM a optickou mikroskopii. KM jmenovité délky 5; 6; 7; 8; 10; 10,5; 25; 50 mm pro šetření minimální síly potřebné pro správné nasátí KM. Při výběru jmenovitých délek KM bylo přihlíženo k následujícímu:

- rentgenovou tenzometrii je velmi obtížné uskutečnit na KM jmenovité délky menší než 5 mm,
- AFM mikroskopii nelze uskutečnit na KM jmenovité délky větší než 10,5 mm,
- šetření minimální velikosti síly potřebné pro správné nasátí KM je velmi obtížné uskutečnit na KM jmenovité délky menší než 5 mm a větší než 50 mm.

4. 2 Vyhodnocení sledovaných parametrů

4. 2. 1 Rentgenová tenzometrie

Měření velikosti a smyslu makroskopických zbytkových napětí bylo realizováno pomocí rentgenové tenzometrie na přístroji X'Pert PRO. Jedná se o nedestruktivní metodu měření zbytkových napětí v povrchové vrstvě KM, tedy nedochází k poškození materiálu KM. Podstatou rentgenové tenzometrie je využití rozptylu (difrakce) rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdálenosti atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím. Stanovené deformace polykrystalického materiálu jsou pak přepočteny na napětí pomocí vztahů teorie elasticity.

Hodnoty zjištěných povrchových normálových zbytkových napětí σ , smykových napětí τ a parametru FWHM z povrchů KM před kalibrací jsou uvedeny v tab. 1 a po kalibraci v tab. 2. Efektivní hloubka vnikání rtg paprsků činila cca 5 μm .

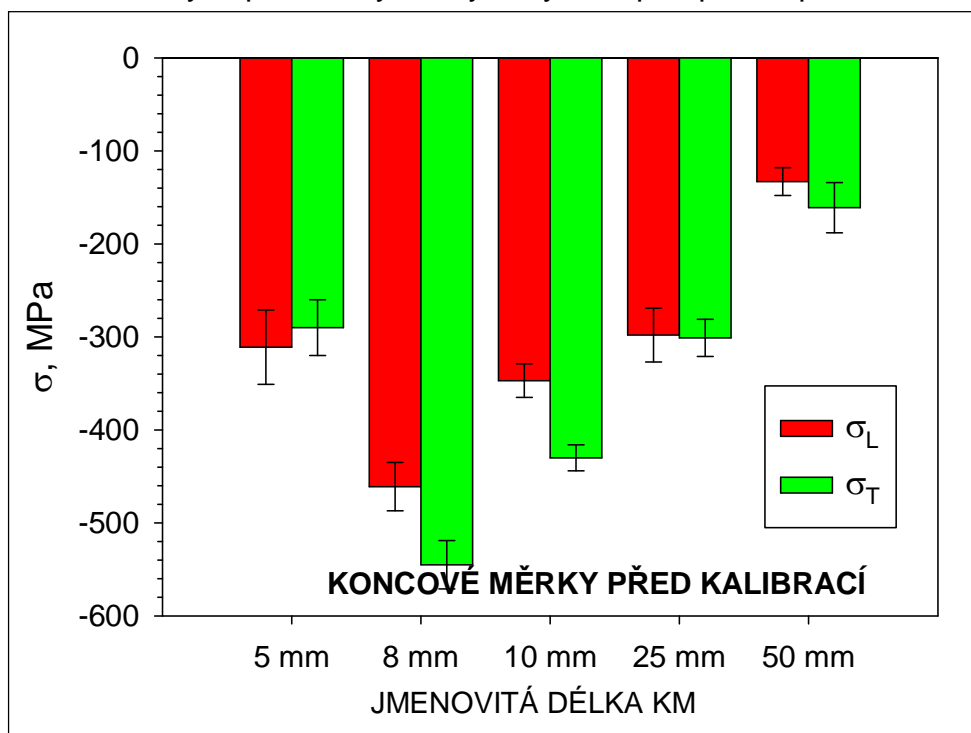
Tab. 1: Hodnoty makroskopických zbytkových napětí σ , smykových napětí τ a FWHM získané z povrchů koncových měrek před kalibrací

Jmen. délka KM [mm]	směr	$\sigma \pm \Delta \sigma \text{ MPa}$	$\tau \pm \Delta \tau \text{ MPa}$	FWHM, ° 2 θ
5	L	-311 \pm 40	14 \pm 8	7,487
	T	-290 \pm 30	26 \pm 7	7,566
8	L	-461 \pm 26	20 \pm 6	7,134
	T	-545 \pm 26	15 \pm 5	7,632
10	L	-347 \pm 18	28 \pm 4	7,187
	T	-430 \pm 14	17 \pm 3	7,475
25	L	-298 \pm 29	19 \pm 7	7,538
	T	-301 \pm 20	15 \pm 5	7,852
50	L	-133 \pm 15	12 \pm 3	7,141
	T	-311 \pm 40	14 \pm 8	7,487

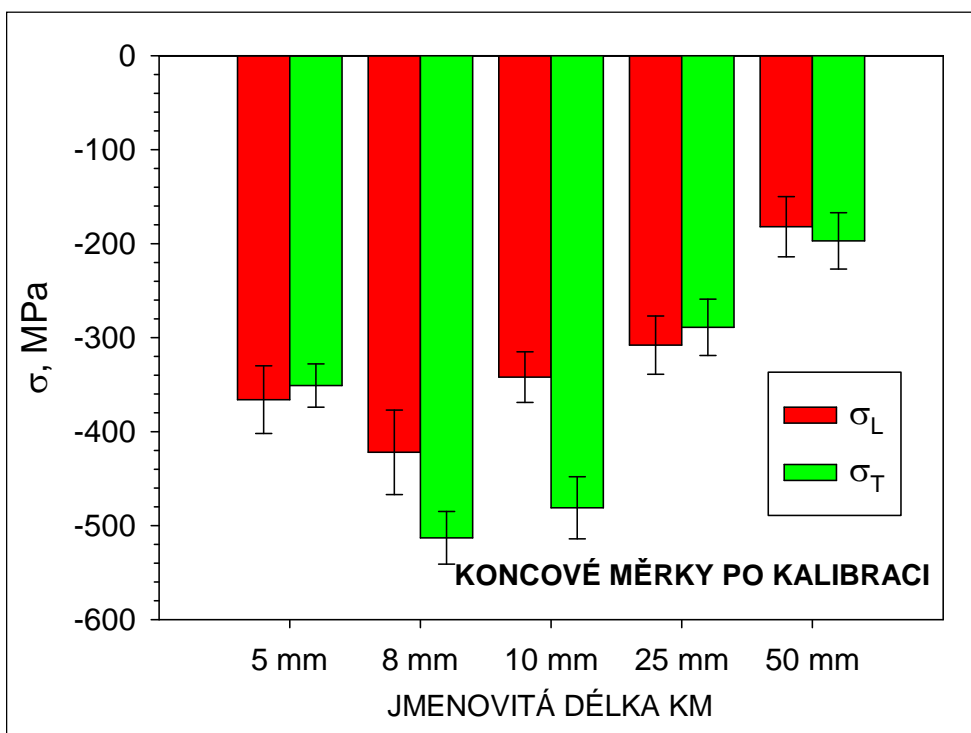
Tab. 2: Hodnoty makroskopických zbytkových napětí σ , smykových napětí τ a FWHM získané z povrchů koncových měrek po kalibraci

Jmen. délka KM [mm]	směr	$\sigma \pm \Delta \sigma \text{ MPa}$	$\tau \pm \Delta \tau \text{ MPa}$	FWHM, ° 2 θ
5	L	-366 \pm 36	8 \pm 8	6,956
	T	-351 \pm 23	20 \pm 5	7,124
8	L	-422 \pm 45	18 \pm 9	7,452
	T	-513 \pm 28	21 \pm 5	7,061
10	L	-342 \pm 27	27 \pm 6	7,172
	T	-481 \pm 33	11 \pm 6	7,377
25	L	-308 \pm 31	21 \pm 7	8,020
	T	-298 \pm 30	26 \pm 7	7,749
50	L	-183 \pm 32	6 \pm 7	7,723
	T	-197 \pm 30	19 \pm 7	7,324

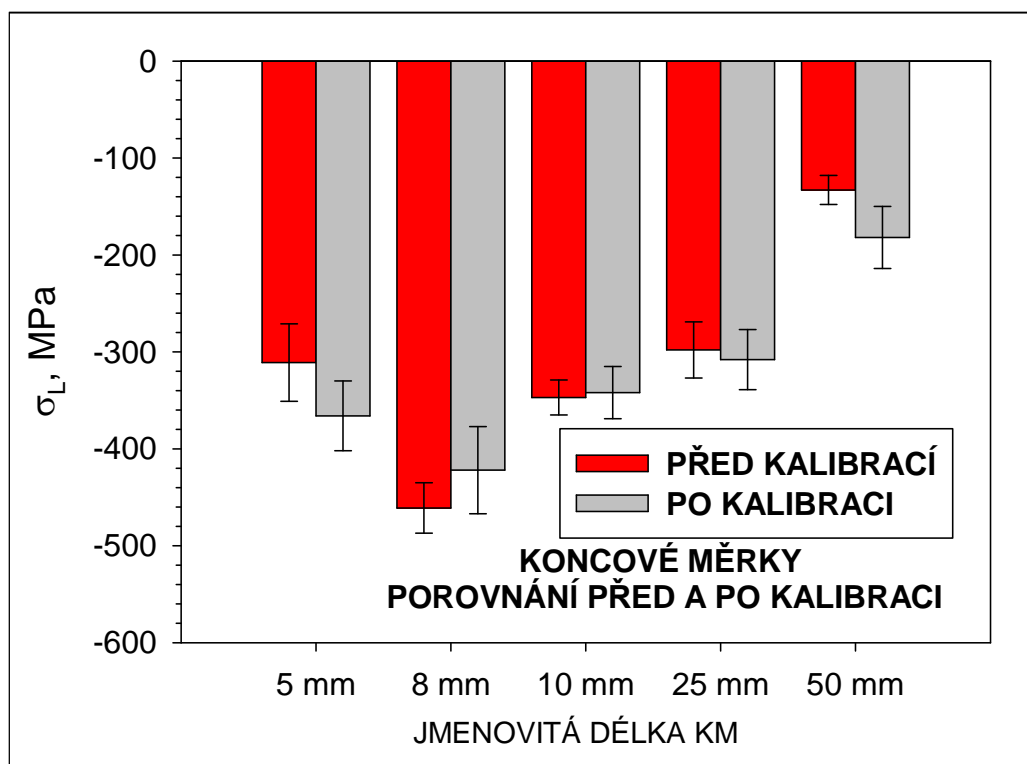
Hodnoty normálových složek makroskopických zbytkových napětí pro analyzované směry L a T jsou znázorněny na obr. 35 a 36. Na obr. 37 a 38 je porovnání naměřených povrchových zbytkových napětí před a po kalibraci.



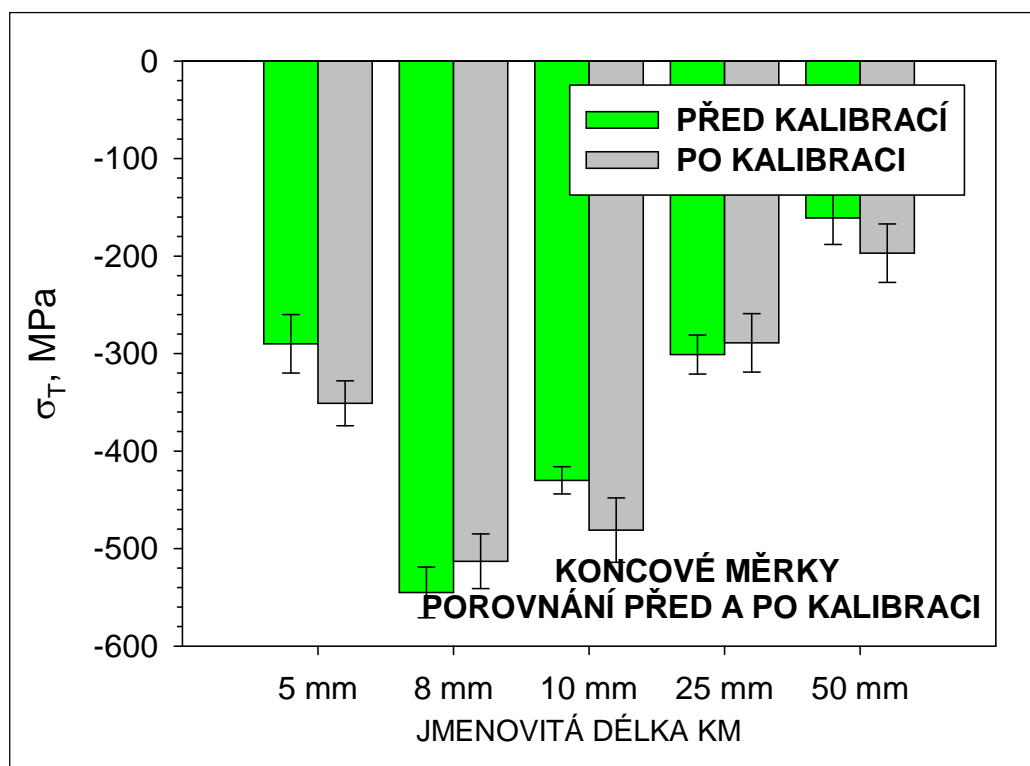
Obr. 35: Hodnoty normálových zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] z povrchů koncových měrek před kalibrací



Obr. 36: Hodnoty normálových zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] z povrchů koncových měrek po kalibraci



Obr. 37: Hodnoty normálových zbytkových napětí σ_L [MPa] z povrchů koncových měrek před a po kalibraci



Obr. 38: Hodnoty normálových zbytkových napětí σ_T [MPa] z povrchů koncových měrek před a po kalibraci

Ve všech případech byla zjištěná makroskopická zbytková napětí tlaková, a to jak ve směru longitudinálním, tak i ve směru transversálním (viz obr. 35 a 36), což se jeví z hlediska tvrdosti, korozivzdornosti, odolnosti proti opotřebení a rozměrové stálosti příznivější než zbytková napětí tahová.

Hodnoty tlakových zbytkových napětí ve směru longitudinálním jsou vždy nižší (mimo KM o jmen. délce 5 mm) v porovnání se zbytkovými tlaky ve směru transversálním, což je pravděpodobně důsledek charakteru mechanické interakce obráběcího nástroje (rotace brusného kotouče s diamantovou emulzí - lapování) s KM (viz obr. 35 a 36).

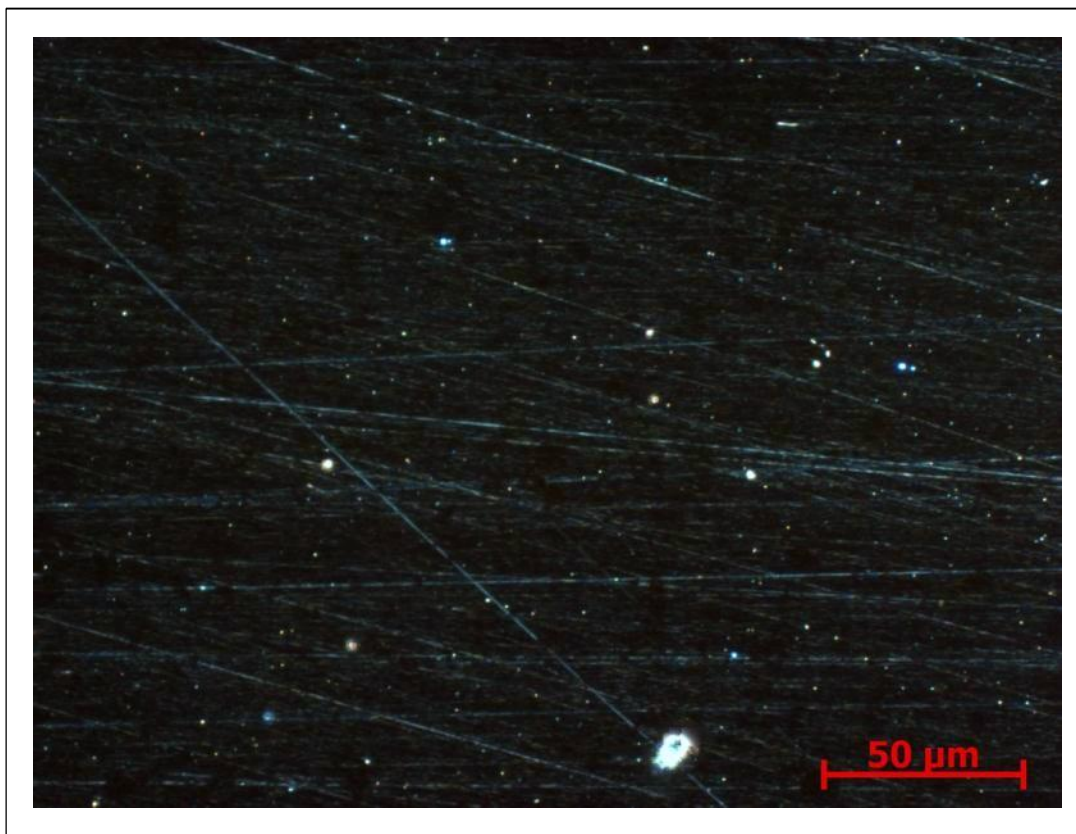
Rozdíly v úrovni zbytkových napětí před a po kalibraci nepřekračují experimentální nejistotu jejich stanovení. Smykové složky τ jsou v obou směrech T i L statisticky nevýznamné (viz tab. 1 a 2).

Parametr FWHM při náklonu $\psi=0^\circ$ se v závislosti na směru měření výrazně neliší, stejně tak nejsou pozorovány významné odlišnosti mezi jednotlivými KM. Tento parametr zahrnuje vliv velikosti zrn (krystalitů) a zbytkových napětí 2. druhu (viz tab. 1 a 2).

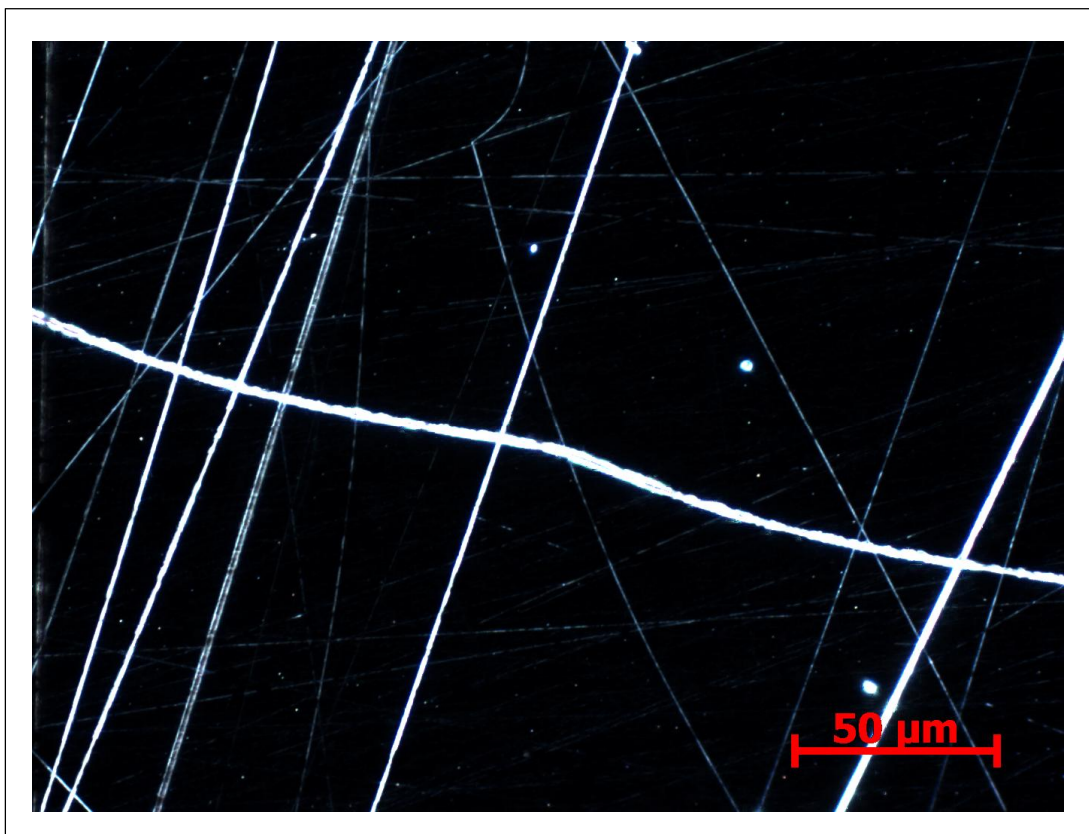
Z těchto naměřených hodnot vyplývá, že kalibrace na interferometru nemá zásadní vliv na velikost a smysl zbytkových napětí v povrchové vrstvě KM.

4. 2. 2 Optická mikroskopie

Kvalitativní zhodnocení povrchu KM bylo realizováno na optickém světelném mikroskopu Carl Zeiss Axio Imager A2. Jedná se o zhodnocení snímků povrchu ve zvětšení 500 x a 1000 x. Byly hledány a hodnoceny škrábance, důlky a výstupky na povrchu – jejich četnost, intenzita apod. U výrazně poškozených oblastí byla zaznamenána jejich poloha (souřadnice), aby bylo možno přenést tyto souřadnice do AFM a podrobně studovat strukturu poškozeného místa. U všech snímků je pro názornost míry poškození umístěno měřítko v pravém dolním rohu. Pro názorné zhodnocení kvality povrchu byly vybrány snímky KM jmenovité délky 8 mm. Na obrázcích 39 a 40 je prezentováno poškození lapované plochy způsobené kalibrací na interferometru ve zvětšení 500 x v režimu DF. Jsou zde patrné výrazné rýhy způsobené nasouváním (nasáváním) měrek na základní desku, což je nezbytné pro uskutečnění vlastní kalibrace. Na základě těchto snímků bylo provedeno detailnější zhodnocení struktury poškozeného místa na AFM mikroskopu.



Obr. 39: Optický snímek lapované plochy koncové měrky jmenovité délky 8 mm – před kalibrací



Obr. 40: Optický snímek lapované plochy koncové měrky jmenovité délky 8 mm – po kalibraci

4. 2. 3 AFM mikroskopie

Podrobné studium struktury KM bylo realizováno na AFM mikroskopu JPK NanoWizard 3 včetně měření drsnosti povrchu. Naměřené hodnoty jsou prezentovány jako topografický obraz. Výsledné topografie jednotlivých vzorků jsou zobrazeny v 2D (obr. 42 a 43) a 3D (obr. 44 a 45) obrazech v měřicím rozsahu 50 x 50 μm . Pohyb skeneru ve směru osy x a y dává informace o vzorku v rovině. Výškové hodnoty v jednotlivých bodech (osa z, kolmá k této rovině) jsou ve výsledných obrazech vyjádřeny barevnou škálou. Určitá výška je přiřazená k danému odstínu barvy, který je možné si vybrat. U všech 2D obrazů je tato stupnice umístěna po pravé straně. Hodnoty v ose x a y jsou udány v jednotkách μm , hodnoty osy z jsou v nm. Měření drsnosti povrchu je pak provedeno výpočtovým mechanismem (Profile Measurement) implementovaným v programu JPK Data Processing a graficky znázorněno průřezovým profilem.

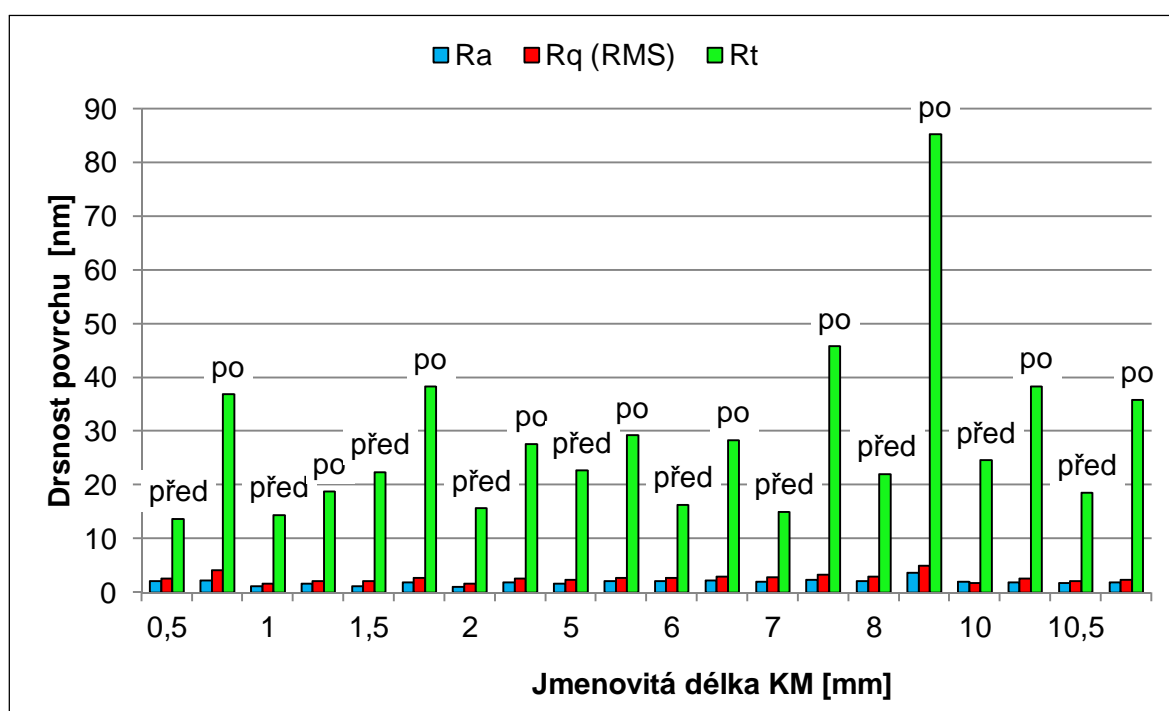
V následující tabulce 3 jsou znázorněny naměřené parametry drsnosti KM před a po kalibraci. Tyto hodnoty byly dále zpracovány do přehlednějšího grafického znázornění (viz obr. 41).

Tab. 3: Naměřené hodnoty drsnosti koncových měrek před a po kalibraci na interferometru

Jmenovitá délka koncové měrky [mm]										
	0,5		1		1,5		2		5	
	před	po	před	po	před	po	před	po	před	po
Ra [nm]	2,062	2,227	1,197	1,607	1,176	1,832	1,079	1,917	1,635	2,154
Rq (RMS) [nm]	2,612	4,124	1,594	2,103	2,047	2,691	1,656	2,563	2,393	2,748
Rt [nm]	13,64	36,90	14,41	18,74	22,39	38,32	15,64	27,56	22,68	29,23
Jmenovitá délka koncové měrky [mm]										
	6		7		8		10		10,5	
	před	po	před	po	před	po	před	po	před	po
Ra [nm]	2,134	2,179	2,010	2,378	2,146	3,711	1,952	1,857	1,764	1,899

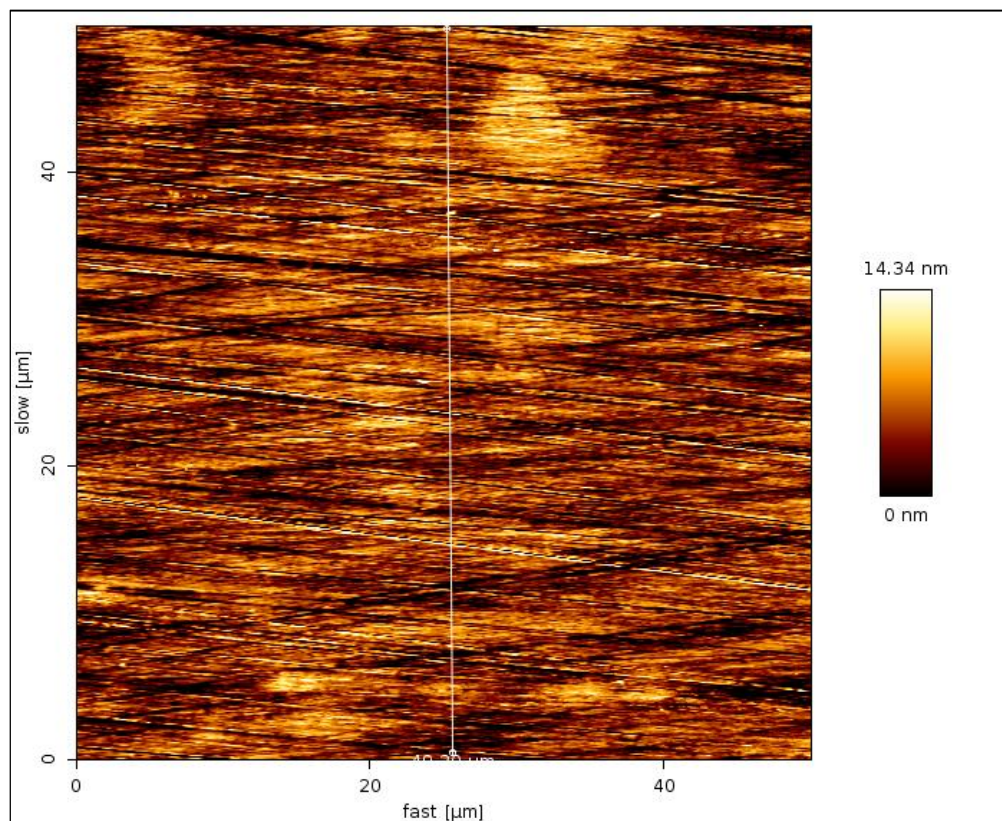
Rq (RMS) [nm]	2,651	2,970	2,850	3,348	2,968	4,911	1,778	2,569	2,163	2,383
Rt [nm]	16,32	28,35	14,94	45,84	22,04	95,27	24,61	38,36	18,55	35,86

Srovnáme-li hodnoty drsnosti z výše uvedené tabulky i následujícího grafu (viz obr. 41), lze si povšimnout výrazného navýšení hodnot drsnosti po kalibraci na interferometru, což poukazuje na značné zhoršení kvality lapovaného povrchu. Poškození bylo vidět na optických snímcích a je výrazné i na následujících topografických obrazech povrchu.

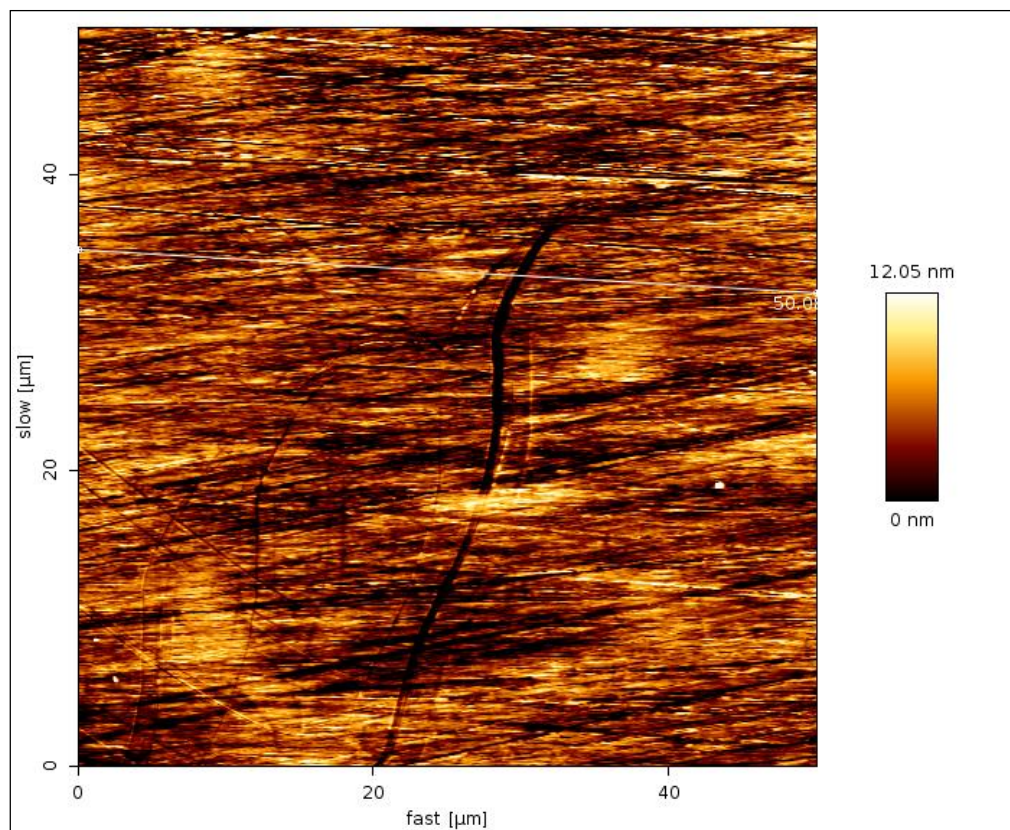


Obr. 41: Parametry drsnosti koncových měrek

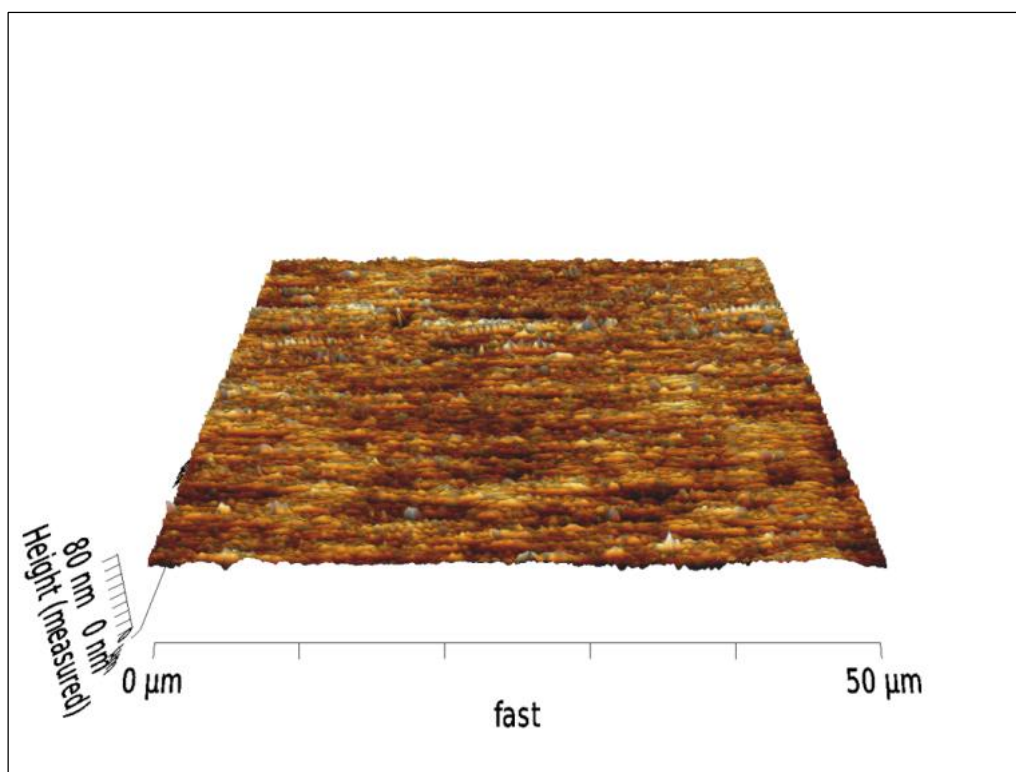
Pro názorné zhodnocení kvality povrchu byly rovněž vybrány snímky KM jmenovité délky 8 mm. Na následujících obrázcích 42, 43 a 44, 45 jsou znázorněny 2D topografie a 3D topografie povrchu před a po kalibraci na interferometru. Na těchto snímcích je prezentováno výrazné poškození povrchu způsobené kalibrací. Na snímcích pořízených po kalibraci (obrázky 43 a 45) je vidět na povrchu výrazná rýha způsobená nasouváním měrky na referenční desku.



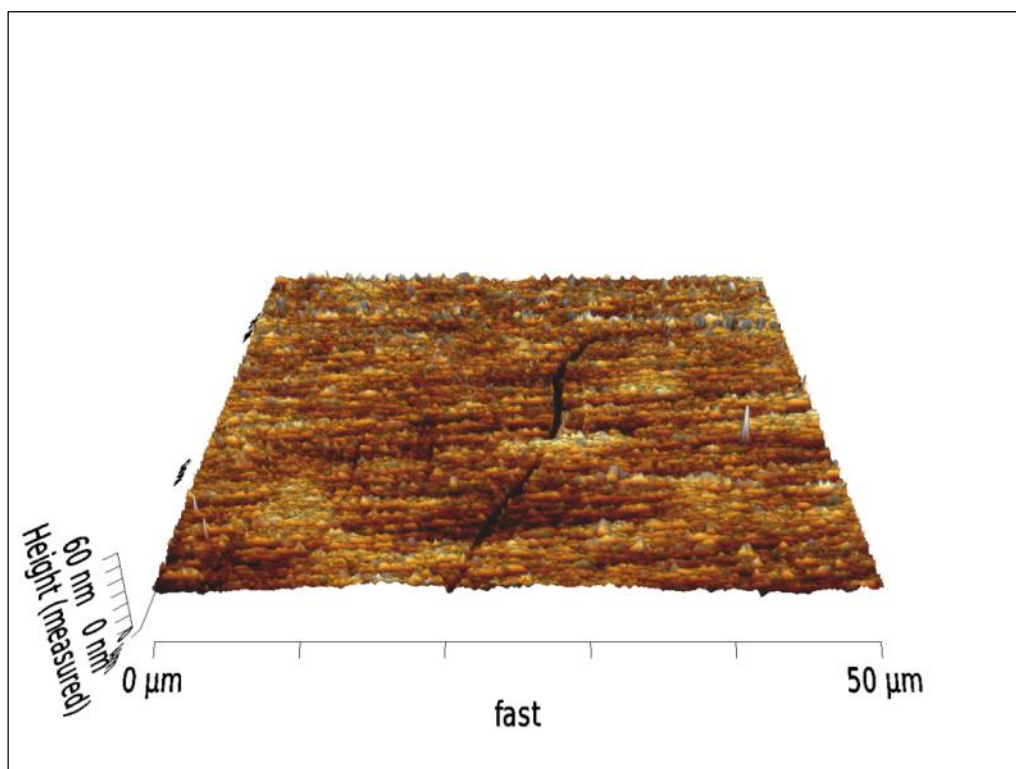
Obr. 42: Snímek 2D topografie povrchu koncové měrky jmenovité délky 8 mm – před kalibrací



Obr. 43: Snímek 2D topografie povrchu koncové měrky jmenovité délky 8 mm – po kalibraci



Obr. 44: Snímek 3D topografie povrchu koncové měrky jmenovité délky 8 mm – před kalibrací



Obr. 45: Snímek 3D topografie povrchu koncové měrky jmenovité délky 8 mm – po kalibraci

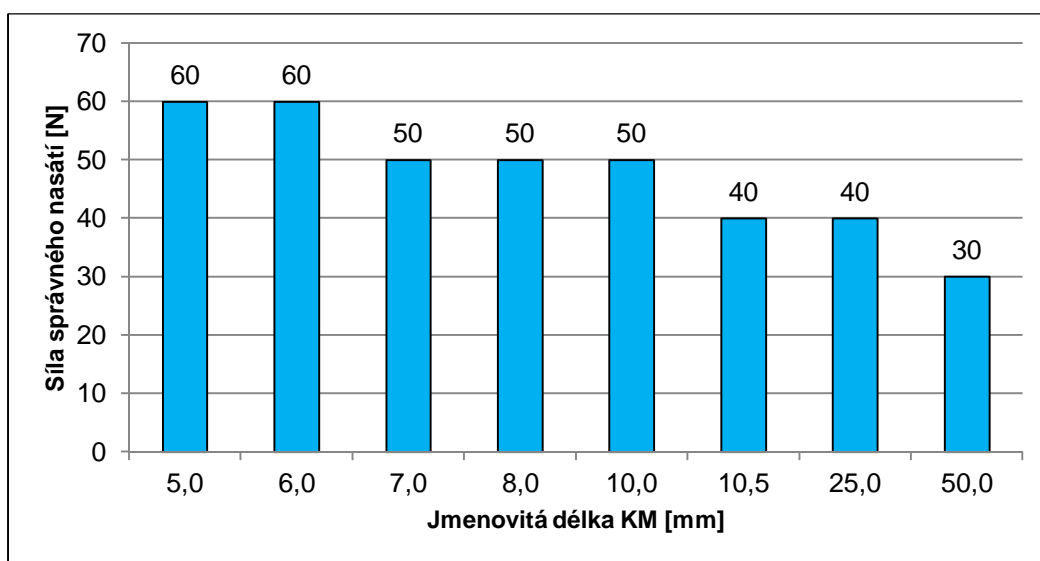
4. 2. 4 Měření minimální síly potřebné pro správné nasátí koncových měrek

K šetření minimální síly potřebné pro správné nasátí byly použity KM nejvyšší jakosti třídy K jmenovité délky 5; 6; 7; 8; 10; 10,5; 25; 50 mm. Metodika tohoto experimentu byla podrobněji rozepsána výše v kapitole 3 (viz str. 46 – 49). V následující tabulce 4 jsou znázorněny výsledky tohoto šetření, které jsou dále přehledně zpracovány do grafu (viz obr. 46).

Tab. 4: Minimální síla potřebná pro nasátí koncových měrek

Jmenovitá délka KM [mm]	Síla zatížení koncové měrky [N]								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5	NE	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO
6	NE	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO
7	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
8	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
10	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
10,5	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
25	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
50	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
ANO = správně nasátá KM									
NE = nenasátá, nesprávně nasátá KM									

Z těchto zjištěných hodnot je patrné, že pro správné nasátí měrky byla třeba minimální síla 30 – 60 N. Přičemž měrky menších jmenovitých délek potřebují pro správné nasátí větší sílu než měrky větších délek. Je to pravděpodobně dáno větší plochou KM, která se na referenční desku nasává, a snadnější manipulací s KM větších jmenovitých délek při jejich nasávání.



Obr. 46: Minimální síla potřebná pro správné nasátí koncových měrek

5. Diskuze výsledků

Obsahem předložené práce bylo studium narušení povrchu KM při interferenční metodě kalibrace. Studium bylo zpracováno na rozsáhlém souboru hodnot, které byly získány několika experimenty.

Nezbytné základní pojmy a informace týkající se KM a jejich kalibrace na interferometru byly uvedeny v teoretické části této práce v kapitolách 1. a 2. KM nejvyšší jakosti K slouží jako etalon pro kalibraci KM nižších jakostí. Jejich cena je dána náročnou technologií výroby a pohybuje se kolem 3 000 Kč za jednu KM. Proto je žádoucí, aby nedocházelo k jejich poškozování vlastní kalibrací. Tato práce si klade za cíl posouzení míry poškozování KM během kalibrace a slouží ČMI jako podkladový materiál pro vývoj nového bezkontaktního přístroje pro kalibraci KM.

Pro zkoumání míry poškození KM byla navržena metodika podrobněji popsána v kapitole 3. Jedná se o rentgenovou tenzometrii a mikrostrukturální hodnocení povrchu KM před vlastní kalibrací na interferometru a následně po kalibraci.

Rentgenová tenzometrie byla realizována v laboratoři Katedry inženýrství pevných látek FJFI ČVUT v Praze na speciálním rentgenovém zařízení určeném pro měření zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobků.

Mikrostrukturální analýza byla realizována v laboratoři Katedry materiálového inženýrství FS TU v Liberci na optickém elektronovém mikroskopu a AFM mikroskopu (Atomic Force Microscopy – Mikroskopie atomových sil).

Kritériem pro porovnávání poškození povrchu KM byla:

- a) zbytková napětí v povrchové vrstvě KM měřená na rentgenovém zařízení X'Pert PRO,
- b) drsnost povrchu měřená na AFM mikroskopu JPK NanoWizard 3,
- c) optické snímky povrchu pořízené na elektronovém mikroskopu Carl Zeiss Axio Imager A2,
- d) topografie povrchu v 2D a 3D obrazech pořízená na AFM mikroskopu JPK NanoWizard 3.

Kalibrace koncových měrek byla provedena v laboratoři ČMI OI v Liberci na interferometru TESA NPL AGI 300 za použití postupů, které jsou uvedeny v kapitole 3.

























Způsobu vyhodnocování získaných dat se věnuje kapitola 4. V této kapitole byly přehledně zpracovány výsledky z rentgenové tenzometrie do tabulek a grafů. Dále zde byly přehledně zpracovány naměřené hodnoty drsnosti povrchů do tabulky a grafu. V neposlední řadě byly porovnávány snímky struktury povrchu KM před a po kalibraci. Z těchto snímků a naměřených hodnot jednoznačně vyplývá, že nasouvání (nasátí) KM na referenční desku, což je nezbytné pro provedení jejich kalibrace, z hlediska mikrostrukturálního značně poškozují kvalitu jejich

















povrchu. Měření pomocí rentgenové tenzometrie neprokázalo, že by kalibrace na interferometru měla vliv na velikost a smysl zbytkových napětí v povrchové vrstvě KM.

Z poznatků získaných během řešení dané problematiky byla navržena metodika pro zkoumání minimální potřebné síly pro správné nasátí KM. Tento experiment byl uskutečněn v laboratoři Katedry obrábění a montáže FS TU v Liberci. Kritériem pro posouzení správného nasátí KM byl obraz nasáté KM přes skleněnou referenční desku. Rozhraní, pokud je KM správně nasáta, by mělo být homogenní šedé barvy. Jakékoliv světlejší nebo barevné odlišení označuje špatný kontakt způsobený špatným nasátím. Na základě zjištěných hodnot byla, jako optimální pro správné nasátí, určena síla 30 – 60N. Pro KM menších jmenovitých délek je potřeba větší síly pro správné nasátí než pro KM větších jmenovitých délek. Je to pravděpodobně dáno větší plochou KM, která se na referenční desku nasává, a snadnější manipulací s KM větších jmenovitých délek při jejich nasouvání. Příliš velká síla při nasouvání (nasávání) měrek na základní desku a jejich opakované nasouvání (nasávání) má vliv na opotřebovávání povrchu KM.

Veškerá naměřená data a snímky před a po kalibraci jsou přehledně zpracovány pro každou jmenovitou délku KM v následující tabulce 5.

Tab. 5: Přehledná tabulka naměřených hodnot a snímků koncových měrek před a po kalibraci na interferometru

Jmen. délka KM [mm]	AFM mikroskop – 50x50 μm		Optický mikroskop – zvětš. 500x		Rentgen – napětí [MPa]		Drsnost povrchu Rq [nm]		Nasá tí při síle [N]
	před	po	před	po	před	po	před	po	
0,5							2,612	4,124	
1							1,594	2,103	
1,5							2,047	2,691	
2							1,656	2,563	
5					$\sigma_L = -311$	$\sigma_L = -366$	2,393	2,748	60
					$\sigma_T = -290$	$\sigma_T = -351$			
6							2,651	2,970	60

7							2,651	3,438	50
8					$\sigma_L = -461$	$\sigma_L = -422$	2,968	4,911	50
					$\sigma_T = -545$	$\sigma_T = -513$			
10					$\sigma_L = -347$	$\sigma_L = -342$	1,778	2,569	50
					$\sigma_T = -430$	$\sigma_T = -481$			
10,5							2,163	2,383	40
25					$\sigma_L = -298$	$\sigma_L = -308$			40
					$\sigma_T = -301$	$\sigma_T = -298$			
50					$\sigma_L = -133$	$\sigma_L = -183$			30
					$\sigma_T = -311$	$\sigma_T = -197$			

Výsledky této diplomové práce potvrdily, že nasouvání (nasávání) KM měrek na základní desku, což je nezbytné pro uskutečnění kalibrace, způsobuje výrazné poškození lapovaných ploch těchto měřidel. Nemá však zásadní vliv na velikost a smysl napětí v povrchové vrstvě KM.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo povrchové šetření KM, které poukáže na narušení povrchu při interferenční metodě kalibrace.

Problematika řešení diplomové práce spadá do oblasti metrologie, oboru interferometrie. Metrologie je vědní disciplína, která se neustále vyvíjí a má podstatný význam pro vědecký výzkum i praktické použití.

Pro pochopení dané problematiky bylo důležité provést nejprve rozsáhlou rešerši týkající se koncových měrek a interferometrie, která se k dané problematice pojí. Získané informace jsou uvedeny v nezbytném rozsahu v úvodní teoretické části práce.

Experimentální část je tvořena dílčími výsledky konkrétního povrchového šetření KM několika metodami. Jedná se o rentgenovou tenzometrii, mikrostrukturální analýzu pomocí AFM mikroskopie a optické mikroskopie, a o šetření minimální potřebné síly pro správné nasátí KM. Nejprve byly zhodnoceny výsledky povrchového šetření před a po kalibraci na interferometru, následně vyhodnoceno šetření minimální potřebné síly pro správné nasátí KM. Ze souboru měření a získaných výsledků je možno poukázat zejména na následující:

- hodnoty napětí v povrchové vrstvě měřené na rentgenovém zařízení před kalibrací a po kalibraci nepotvrdily vliv vlastní kalibrace na smysl a velikost těchto napětí,
- drsnost povrchu KM měřená po kalibraci na interferometru byla očividně vyšší než drsnost povrchu měřená před kalibrací, což je hlavním měřítkem pro výrazné opotřebení povrchu,
- srovnáme-li snímky z optického mikroskopu pořízené před kalibrací a po kalibraci, vidíme na snímcích po kalibraci v černém poli několik výrazných bílých rýh, které znázorňují poškození povrchu,
- srovnáme-li snímky 2D a 3D topografie povrchu z AFM mikroskopu pořízené před kalibrací a po kalibraci, vidíme na snímcích po kalibraci výrazné rýhy, které rovněž znázorňují poškození povrchu,
- šetřením minimální síly potřebné pro správné nasátí KM na základní desku byla zjištěna minimální síla pohybuující se v rozmezí 30 – 60N.

Výsledné závěry z tohoto šetření KM poslouží ČMI jako podkladové materiály k vývoji nového zařízení pro bezkontaktní metodu kalibrace KM.

Seznam použité literatury

- [1] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie – 1. část* [online]. [cit. 2013-03-13]. Ostrava, Vysoká škola báňská, 2004. Dostupné z WWW: <<http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>>
- [2] DOIRON, Theodore. Gauge Blocks – *A Zombie technologie NIST* [on-line]. [cit. 2013-03-12]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. May – June 2008, vol. 113, no. 3, p. 175 - 184. Dostupné z WWW: <<http://emtoolbox.nist.gov/Publications/NISTJResMay-Jun2008-113-3.pdf>>
- [3] LEWIS, Andrew J.; HUGHES, Ben; ALDRED, Philip J. E. *Long-term study of gauge block interferometer performance and gauge block stability*. Metrologia, 47, July 2010, p. 473 - 486.
- [4] DOIRON, Theodore; BEERS, John S. *The Gauge Block Handbook* [on-line]. [cit. 2013-03-12]. NIST Monograph 180. 2005. Dostupné z WWW: <<http://emtoolbox.nist.gov/Publications/NISTMonograph180.pdf>>
- [5] BUCHTA, Zdeněk; ČÍŽEK, Martin; ŘEŘUCHA, Šimon; et al. *Automatický systém pro bezkontaktní kalibraci koncových měrek*. Jemná mechanika a optika, roč. 57, č. 10-2010, s. 289 – 291. ISSN 0447-6441
- [6] DECKER, J. E. *Overview of Uncertainty Analyses for Gauge Block Calibration*. Institute for national measurement standards. 2004.
- [7] KURIYAMA, Y.; YOKOYAMA, Y.; ISHII Y.; ISHIKAWA J. *Development of a New Interferometric Measurement System for Determining the Main Characteristics of Gauge Blocks*. Annals of the CIRP. 2006, vol. 55, no. 1.
- [8] Wikipedia. *Koncové měrky* [online], [cit. 2013-4-10]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Koncov%C3%A9_m%C4%9Brky>
- [9] PETŘOVSKÁ, Lenka; ČEPOVÁ, Lenka. *Strojírenská metrologie* [online]. [cit. 2013-09-10]. Ostrava, Vysoká škola báňská, 2011. Dostupné z WWW: <<http://www.346.vsb.cz/Petrovska,%20Cepova%20-%20strojirenska%20metrologie.pdf>>
- [10] ANDRŠOVÁ, Zuzana; VOLESKÝ, Lukáš. *Postupy/metody měření při povrchovém šetření koncových měrek*. TUL Fakulta strojní, 2013. 14 s.
- [11] DVOŘÁČEK, František. *Interferenční metoda kalibrace koncových měrek*. ČMI OI Liberec, 2013. 6 s.
- [12] ŠRÁMEK, Jan. *Vyjadřování nejistoty u přesných délkových měření II*: diplomová práce. Brno: VUT, 2011. 63 s., 8 příl.

- [13] SMOLEK, Jan. *Měření fyzikálních a technických veličin - Měření délkových rozměrů – Základní měřky*. [online]. [cit. 2013-11-15]. Brno, SPŠ a VOŠT, 2007. Dostupné z WWW: http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_22-08.pdf
- [14] *Metodika AFM* [on-line]. [cit. 2013-03-15]. Dostupné z WWW: http://atmilab.vpol.cz/texty/dipl_bio.pdf
- [15] *Technické informace o drsnosti* [on-line]. [cit. 2013-11-16]. Firemní literatura JENOPTIK. Dostupné z WWW: <http://www.hommel-etamic.cz/cz/techinfo_01.htm>
- Drsnost povrchu dle DIN, EN, ISO* [on-line]. [cit. 2013-11-16]. Firemní literatura JENOPTIK. Dostupné z WWW: <<http://www.hommel-etamic.cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso>>
- [16] Stanovení drsnosti povrchu [on-line]. [cit. 2013-11-16]. Studijní podklady pro studenty. SOŠ Blansko. Dostupné z WWW: <<http://www.sosblansko/index.php?page=projekty>>
- [17] ZEMČÍK, Oskar. *Změna vlastností oběžných drah valivých ložisek po aplikaci válečkování* [online]. [cit. 2013-11-28]. Zkrácená verze disertační práce. Brno, VUT FS, Ústav strojírenské technologie. 2002. 36 s. Dostupné z WWW: <<http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2131-2.pdf>>
- [18] GANEV, Nikolaj. *Poznání nehmotného světla zbytkových napětí* [online]. [cit. 2013-11-30]. Praha, ČVUT FJFI, 2013. Sborník příspěvků odborného semináře. Dostupné z WWW: <http://integrita.zcu.cz/download/ws3_sbornik.pdf>
- [19] KOLAŘÍK, Kamil; GANEV, Nikolaj; KUČERÁKOVÁ, Monika; et al. *Ověření úrovně zbytkových napětí v povrchové vrstvě koncových měrek před a po kalibraci*. Praha ČVUT FJFI, 2013. 8 s.
- [20] LEINVEBER, J.; ŘASA, J.; VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Vydání 3. Praha, Scientia s.r.o., 1999. ISBN - 80 - 7183 - 164 - 6

Seznam příloh

Příloha 01 – Mikroskop AFM

Příloha 02 – Vyhodnocení drsnosti povrchu

Příloha 03 – Rentgenová tenzometrie

Příloha 04 – CD-ROM – Přehled všech naměřených hodnot

Příloha 01:

Mikroskop AFM

Tato práce byla věnována analýze povrchu koncových měrek během interferenční metody jejich kalibrace. Analýza povrchu byla prováděna pomocí mikroskopu AFM, na němž bylo realizováno měření drsnosti povrchu měrek. Princip funkce tohoto přístroje bude nyní podrobněji popsán.

Mikroskopie skenující sondou (Scanning Probe Microscopy, SPM) je soubor mikroskopických technik, jejichž základním společným principem je těsné přiblížení měřicí sondy ke vzorku. Tyto přístroje dokáží poskytovat obraz skenovaného povrchu na atomární úrovni. Jednou z metod, která patří do rodiny SPM mikroskopů je mikroskopie atomárních sil (Atomic Force Microscopy, AFM). Získaná informace je pouze lokální a pro charakterizaci celého povrchu je nutno provádět postupná měření ve více bodech, tj. rastrování povrchu vzorku sondou. Výsledkem je postupně sesbíraný soubor dat, který je konstruován počítačem [14].

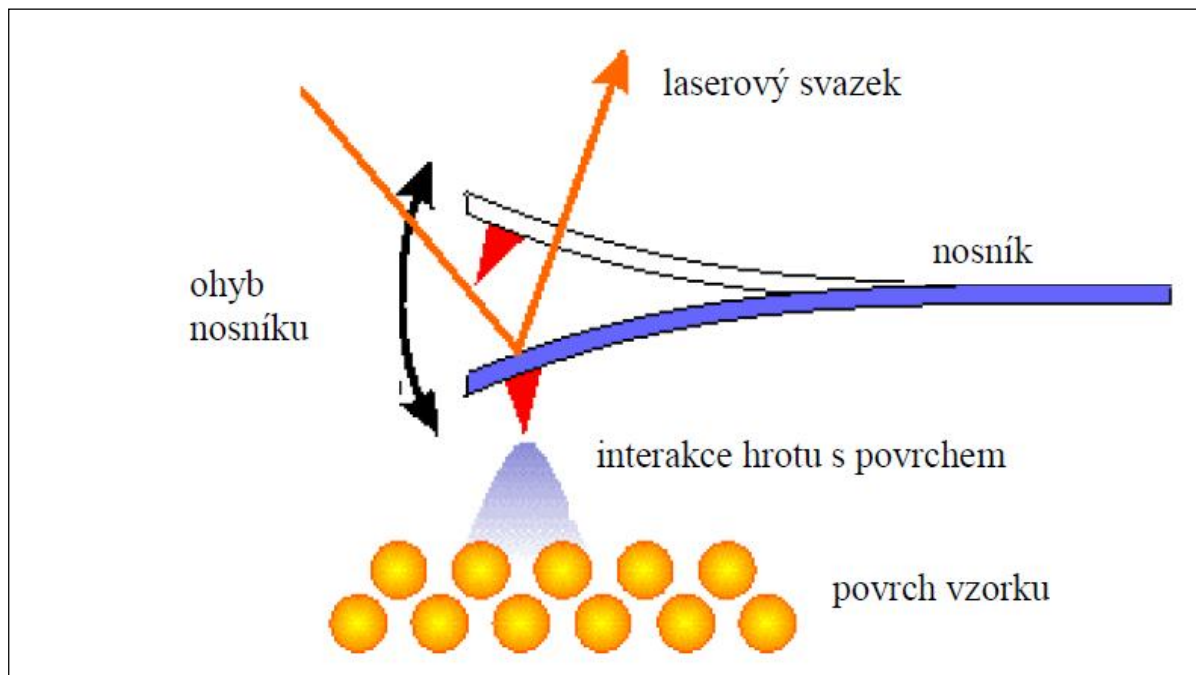
1. Stavba AFM

Základem měřicí jednotky je sonda, kterou je skenován povrch vzorku. Získaný signál pak pochází z detekce interakcí mezi sondou a zkoumaným povrchem. Prostorová distribuce velikosti signálu měřeného ve skenované oblasti pak poskytuje prostorově závislý signál, který slouží jako základ pro vytvoření trojrozměrného obrazu. V závislosti na typu senzoru a módu, ve kterém daný přístroj pracuje, skeny (obrázky) zobrazují topografii, elektronovou strukturu nebo mechanické, termální či jiné vlastnosti zkoumaného povrchu. Prostorové rozlišení získaných snímků je závislé zejména na měřených vlastnostech a typu interakce mezi sondou a povrchem [14].

AFM má ve funkci sondy ostrý hrot upevněný na volném konci pružného nosníku s malou konstantou tuhosti. Mezi nejdůležitější parametry patří poloměr vrcholu hrotu R_c (10 – 50 nm, pro aplikace s téměř atomárním rozlišením se používají hroty s R_c do 10 nm), který ovlivňuje maximální rozlišení a jeho délka a štíhlost, která ovlivňuje schopnost zobrazovat ostré hrany a hluboké zářezy. Dalšími důležitými parametry nosníku jsou jeho chemická a mechanická odolnost. K parametrům nosníku patří jeho rozměry (délka ~ 100 μm , tloušťka ~ 0,5 μm), konstanta tuhosti (0,1 – 100 N/m) a rezonanční frekvence. V neposlední řadě je nutno zvažovat způsob uchycení nosníku k mikroskopu. Nosník i hrot bývají obvykle vyráběny ze stejného materiálu, kterým je čistý křemík, křemík s různými příměsemi a další. Dnes jsou běžně dostupné nosníky s integrovanými hroty vyráběné polovodičovou technologií [14].

2. Funkce AFM

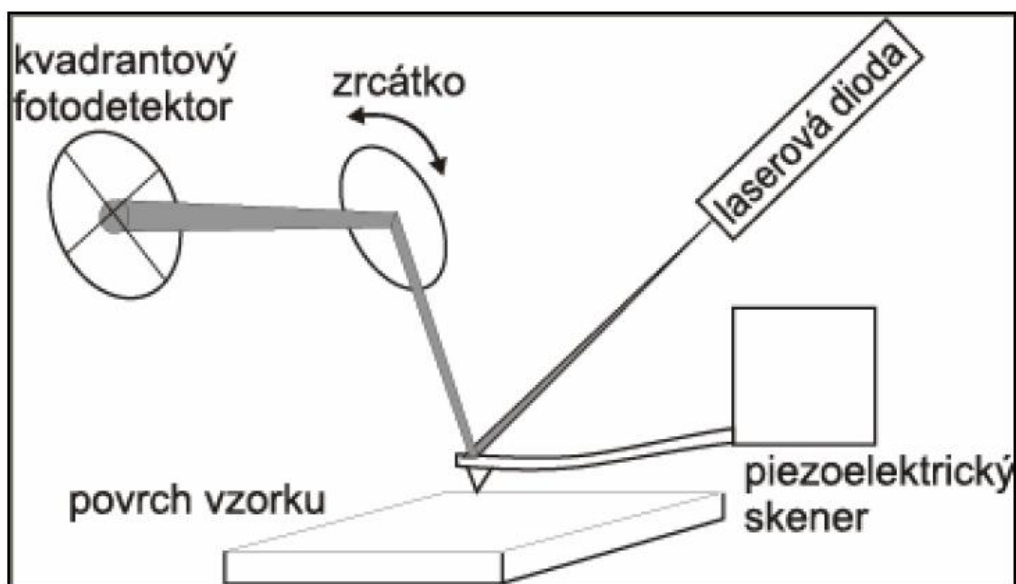
V blízkosti vzorku působí na skenující hrot různé druhy sil, především krátkodosahové odpuzivé síly elektrostatického původu, síly vyplývající z Paulliho principu a dalekodosahové přitažlivé síly van der Waalsovy síly (síly dipól-dipólového charakteru). Díky těmto silám dochází v blízkosti povrchu k vychýlení hrotu s nosníkem z rovnovážné polohy a tím k deformaci nosníku (viz obr. 1) [14].



Obr. 1: Schematický náčrt interakce mezi hrotem a skenovaným povrchem [14]

Skenovací systém slouží k vlastnímu posunu hrotu po vzorku, tedy k rastrování povrchu. Jádrem je piezoelektrická keramika (= piezokeramika, materiál vytvořený spečením zrn nějaké piezoelektrické látky, nejčastěji tuhý roztok PbZrO_3 a PbTiO_3), která se v závislosti na přivedeném napětí V vratně deformuje. Pohyb piezokeramiky je reprodukovatelný a v závislosti na konstrukci piezokeramiky je umožněn pohyb napojeného nosníku v jednotlivých osách x , y , z . Realizovatelné posuny nosníku po ploše vzorku (rovině x , y) mohou být menší než 0,1 nm. Pomocí skeneru se tedy sonda přesunuje v rovině vzorku a v každém měřeném bodě je stanoven soubor dat (x, y, V) , která jsou následně přidruženým softwarem vyhodnocena [14].

Jak již bylo řečeno, vzájemné silové působení mezi hrotem a povrchem skenovaného vzorku je základem AFM signálu. Toto silové působení způsobuje ohyb nosníku z jeho počáteční hodnoty a míra ohybu je detekována. Nejčastější metodou detekce je fokusování (zaostřování) laserového paprsku na konec nosníku a odtud se paprsek odráží na fotodiodový detektor rozdělený na čtyři segmenty. V závislosti na odklonu nosníku od počáteční polohy dopadá odražený laserový svazek během skenování nerovnoměrně do kvadrantu fotodetektoru a poměry intenzit světelného svazku v různých kvadrantech jsou zdrojem údajů o vychýlení nosníku (viz obr. 2). Citlivost detekce ohybu nosníku je řádově 10^{-2} nm [14].

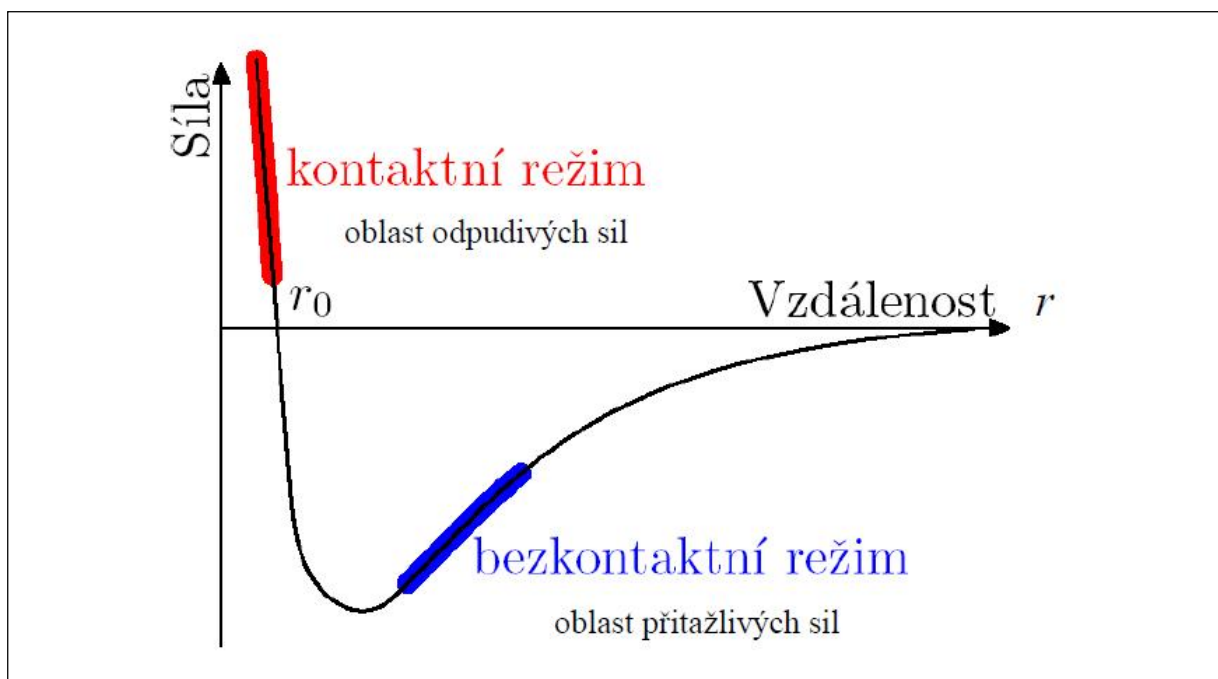


Obr. 2: Schéma detekce ohybu nosníku [14]

Protože je při AFM měření hrot udržován velmi blízko zobrazovaného povrchu (nm), je velmi náchylný na náhodné změny relativní vzdálenosti, které mohou ovlivnit měření nebo poškodit vzorek či hrot. Z tohoto důvodu je nutné mikroskop vibračně izolovat. Izolace spočívá ve vhodné konstrukci mikroskopu (velká tuhost rámu, snížení efektivní délky rámu), umístění přístroje ve vhodném prostředí (přízemí, sklep) a na vhodnou podložku (těžké mramorové stoly, stoly s pneumatickým tlumením). Při přesných měřeních nelze zanedbat ani vibrace přenášené vzduchem a pro přesná měření je nutné AFM měřicí systém přiklopit speciálním krytem. Podobně jako vibrace se negativně projevují i teplotní změny (jednotlivé části mikroskopu mají různou tepelnou roztažnost). Velmi závažná je také změna teploty v průběhu měření (např. vlivem proudění vzduchu). Určitým řešením je volit větší rychlosti skenování, což má ovšem za následek zhoršení kvality zobrazení [14].

3. Pracovní režimy AFM

Při interakci mezi hrotem a vzorkem se mezi koncovými atomy uplatňují různé druhy sil. Přiblížíme-li k sobě dva atomy na velmi malou vzdálenost (desítky nanometrů), začne mezi nimi působit přitažlivá van der Waalsova síla, která obecně působí mezi dvěma libovolnými atomy bez ohledu na jejich chemickou podstatu či vazbu v látce. Tato síla způsobí, že se atomy (budou-li volné) k sobě přiblíží. Po velmi těsném přiblížení (subnanometrové) však začnou působit na atomy další síly, tentokrát odpudivé, které jsou způsobeny překryvem elektronových obalů obou atomů. V určité vzdálenosti r_0 lze najít sílu o nulové hodnotě (viz obr. 3) [14].



Obr. 3: Průběh výsledných sil působících mezi dvěma atomy [14]

Budeme-li mezi atomy úmyslně udržovat jinou vzdálenost r než r_0 , bude se působící síla snažit atomy buď přiblížit ($r > r_0$) nebo oddálit ($r < r_0$). Měřením této síly pak můžeme určit, jaká je vzdálenost mezi oběma atomy. Uvážíme-li, že jeden z atomů bude patřit vzorku a druhý atom bude tvořit naši sondu, získáme základ pro mikroskopii atomárních sil. Protože z rozdělení silové křivky vyplývá, že jedné síle mohou někdy odpovídat dvě vzdálenosti (viz obr. 3), není závislost (síla-vzdálenost) jednoznačná. Abychom tuto nejednoznačnost odstranili, používá se AFM v několika režimech: Kontaktním, bezkontaktním a poklepovém [14].

Kontaktní režim

Kontaktní režim, zvaný také repulsivní režim, je nejjednodušším nejstarším způsobem, při kterém se hrot pohybuje přímo v mechanickém kontaktu se vzorkem a mezi hrotem a vzorkem působí odpudivé síly ($r < r_0$). Na hrot v těsné blízkosti povrchu působí tři hlavní síly [14].

Odpudivé síly, vznikající na základě Pauliho vylučovacího principu, který brání tomu, aby elektrony příslušné atomům hrotu měly stejnou vlnovou funkci jako elektrony příslušné atomům vzorku [14].

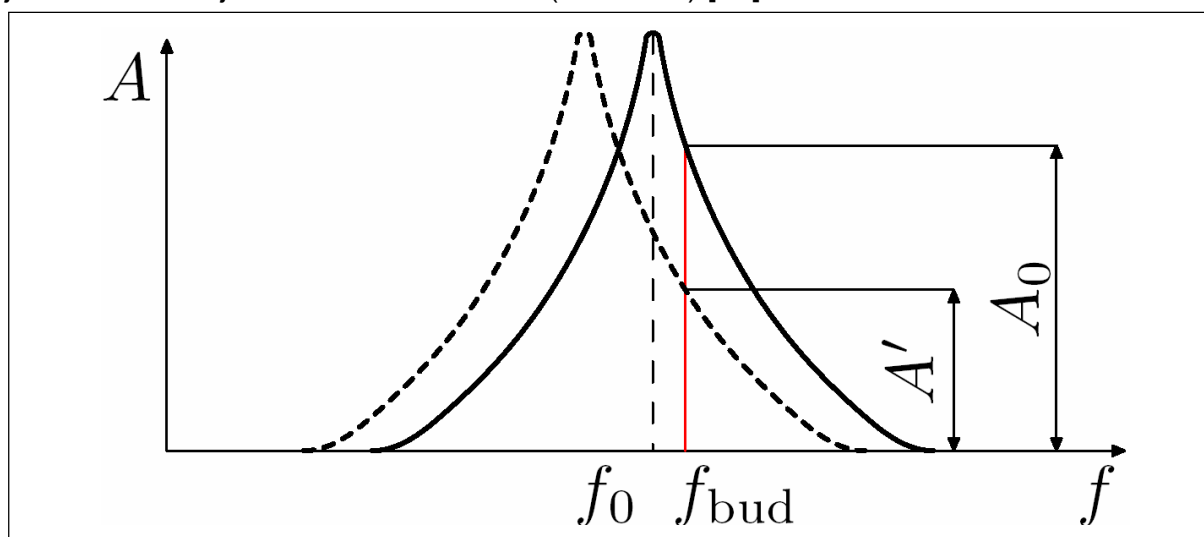
Přitažlivé van der Waalsovy síly, které mají charakter dipol-dipolové interakce. Tyto síly mají původ v nerovnovážené distribuci náboje elektronu během velmi krátkých okamžiků. Tato nerovnováha dává vzniknout obecně multiplům, které dále indukují podobnou nerovnováhu ve svém okolí. Tyto síly jsou mnohem menší než elektrostatické síly a jsou nezávislé na chemickém složení zobrazovaného povrchu nebo zobrazujícího prostředí [14].

Pružná síla nosníku udržující hrot v kontaktu s povrchem. Tato síla je závislá na míře ohybu a konstantě tuhosti nosníku [14].

Výsledná síla mezi hrotem a vzorkem působící na hrot je odpudivá, repulsivní.

Bezkontaktní režim

V bezkontaktním režimu je hrot udržován ve vzdálenosti cca 5 – 15 nm nad povrchem vzorku a k zobrazování jsou využity přitažlivé síly ($r > r_0$), které ohýbají nosník směrem k povrchu vzorku. Protože zde není hrot v mechanickém kontaktu se vzorkem, nemůže docházet k poškození vzorku. Na druhou stranu větší vzdálenost hrotu od vzorku znamená menší hodnotu působící síly, což vede k menšímu ohnutí nosníku a tedy menší citlivosti systému a větší náchylnosti na šum. Aby byl zvýšen odstup signálu od šumu, je používána oscilační metoda. Volný konec nosníku je nucen kmitat s vysokou frekvencí (cca 100 – 400 kHz) a je měřena amplituda kmitání volného konce nosníku s hrotem, kdy velikost amplitudy je volena tak, aby se hrot nedotknul. Závislost amplitudy A na budící frekvenci oscilačních kmitů f_{bud} , $A = A(f)$, je označována jako rezonanční křivka (viz obr. 4) [14].



Obr. 4: Tvar rezonanční křivky [14]

Pokud je kmitající nosník s hrotem v blízkosti povrchu, kde na něj začnou působit síly, pak se tyto síly projeví změnou efektivní tuhosti nosníku, která se promítne do změny rezonanční frekvence a celá rezonanční křivka se posune vlevo nebo vpravo, dle znaménka působící síly. Bude-li nosník nucen kmitat stále se stejnou frekvencí, projeví se posun rezonanční křivky prudkým poklesem amplitudy kmitu A' , kdy právě změny této amplitudy jsou použity ke konstrukci obrazu povrchu [14].

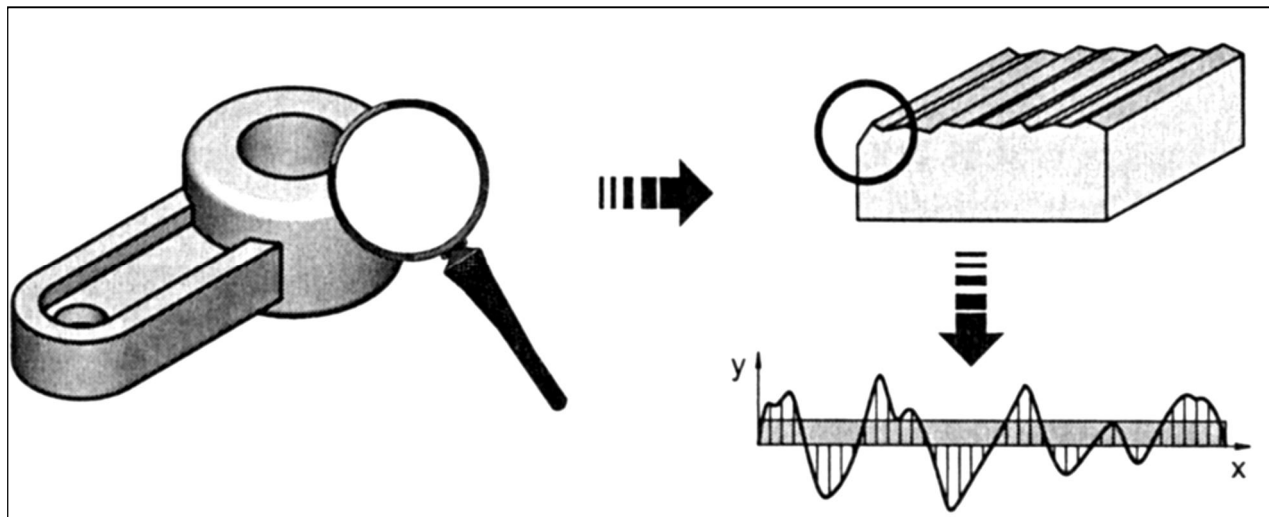
Periodický kontaktní režim

Periodický kontaktní režim (pulzní) bývá v anglické literatuře označován jako tapping nebo intermittent. Motivací pro vývin tohoto pracovního režimu je překonání pracovních problémů při zobrazování v nekontaktním režimu a zároveň minimalizace příčných sil mezi vzorkem a hrotem, které ztěžují skenování v kontaktním režimu [14].

Zvýšená amplituda u tohoto režimu vede k tomu, že v oblasti bodu obratu u povrchu vzorku hrot poklepává. Posunuje-li se hrot v rastru podél vzorku, je po většinu času mimo kontakt se vzorkem, a proto je značně snížena možnost poškození vzorku tažením hrotu po povrchu. Tím, že je hrot občas v kontaktu se vzorkem naopak může dojít ke zvýšení rozlišení v porovnání s bezkontaktním režimem. K měření jsou opět používány amplitudy kmitů, teoretický rozbor je však složitější [14].

Příloha 02:

Vyhodnocení drsnosti povrchu

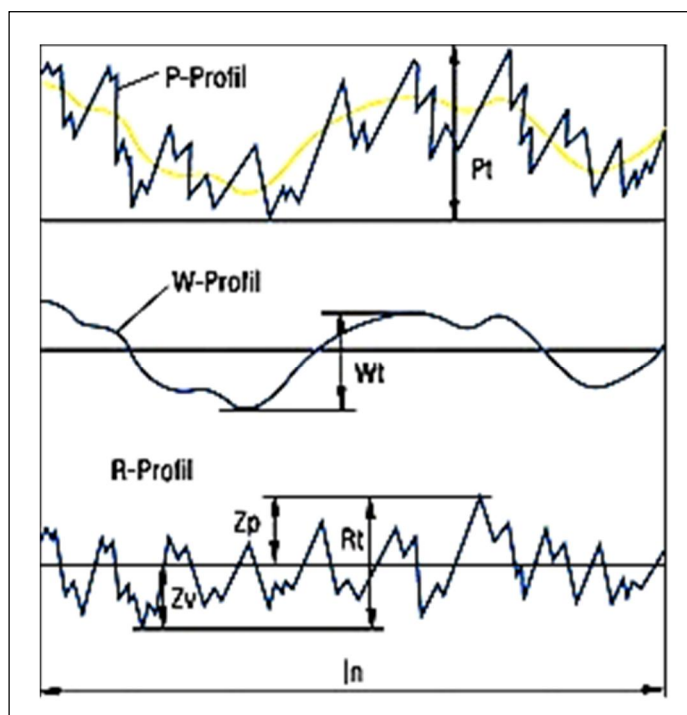


Obr. 1: Stanovení drsnosti povrchu [16]

Jedním ze základních způsobů hodnocení kvality povrchu je měření drsnosti povrchu. Drsnost sledované plochy je pak většinou charakterizována pomocí normou daných veličin. Základní parametry drsnosti sloužící pro hodnocení drsnosti povrchu jsou [15]:

Profil povrchu

Pohybem snímače drsnoměru se získá dvoudimenzionální profil jako obraz zkoumaného povrchu. Filtrací podle DIN EN ISO 11562 se z nefiltrovaného primárního profilu (P – profil) získá profil drsnosti (R – profil) a profil vlnitosti (W – profil). Na těchto třech profilech jsou pak všechny veličiny definovány a podle profilu analogicky označeny P, R, nebo W. Vztažnou čarou pro definici parametrů je uvnitř základní délky l_p , l_r , l_w střední čára. Pokud není stanoveno jinak, je dovoleno měření pro zjištění parametrů drsnosti a vlnitosti přes $l_n = 5 l_r$, resp. $l_n = 5 l_w$ [15].



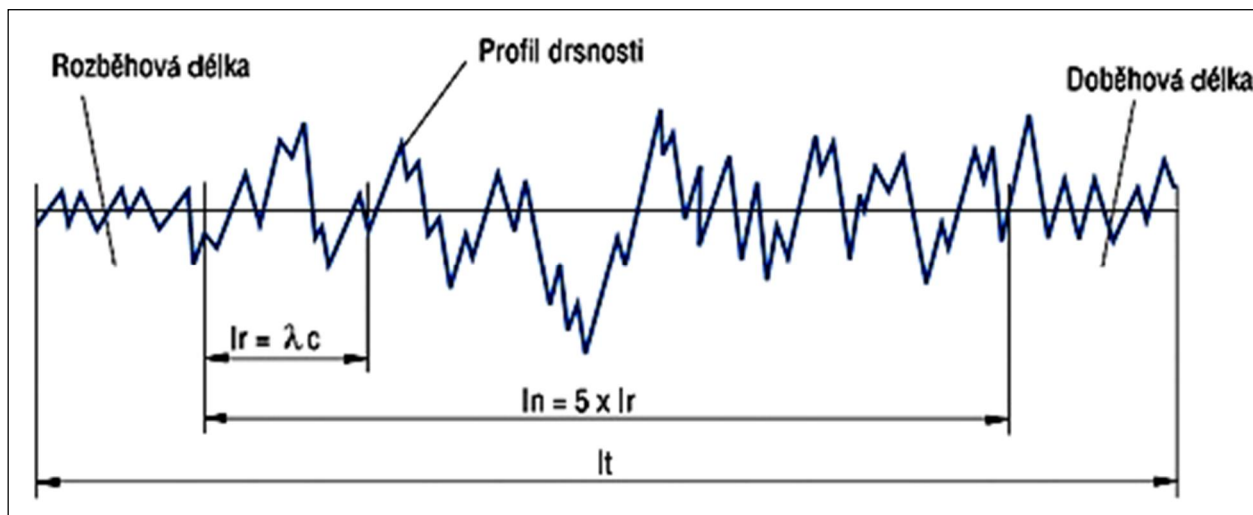
Obr. 2: P - profil, R - profil a W – profil [15]

Na takto nasnímaném povrchu se dle DIN EN ISO 4287 vyhodnocují veličiny [15]:

- Pt :** **hloubka profilu** – nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami z nefiltrovaného profilu povrchu uvnitř měřené délky l_n ,
- Wt:** **hloubka vln** – vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem vyrovnaného profilu vlnitosti (drsnost odfiltrována) uvnitř měřené délky l_n ,
- Rt:** **nejvyšší hloubka drsnosti** – svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubší rýze filtrovaného profilu drsnosti uvnitř měřené délky l_n .

Měřené délky

Profil drsnosti se skládá z elementů oddělených podle vlnové délky profilovým filtrem λ_c (cut-off). Mezní vlnová délka charakterizuje způsob filtrace k oddělení vlnitosti a drsnosti. Celková délka l_t je délka pohybu snímače během kterého se snímají úchytky tvaru povrchu. Ta je delší než měřená délka l_n (vyhodnocovaná délka), ze které se pomocí filtru získá profil drsnosti. Až na určité výjimky jsou všechny parametry drsnosti definovány na základní délce l_r . Zjišťováno je však pravidelně jako střední hodnota pět základních délek l_r . Základní délka l_r odpovídá mezní vlnové délce λ_c . Schematické vyjádření měřených délek je na obr. 3 [15].



Obr. 3: Měřené délky [15]

Základní délka l_r – délka ve směru osy x používaná pro rozpoznání nerovnosti charakterizujících daný profil, základní délka pro drsnost l_r je číselně rovna hodnotě filtru λ_c [15],

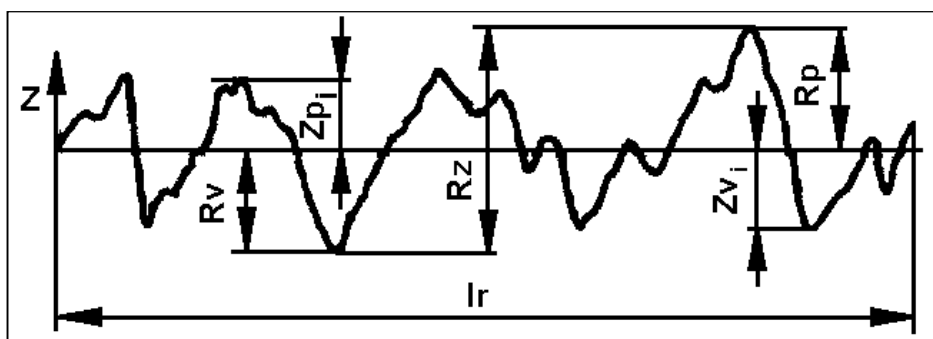
Vyhodnocovaná délka l_n – délka ve směru osy x používaná pro posouzení vyhodnocovaného profilu, vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu a více základních délek [15].

Výškové (amplitudové) parametry

R_p – **největší výška výstupku profilu** – výška Z_p největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky l_r [15],

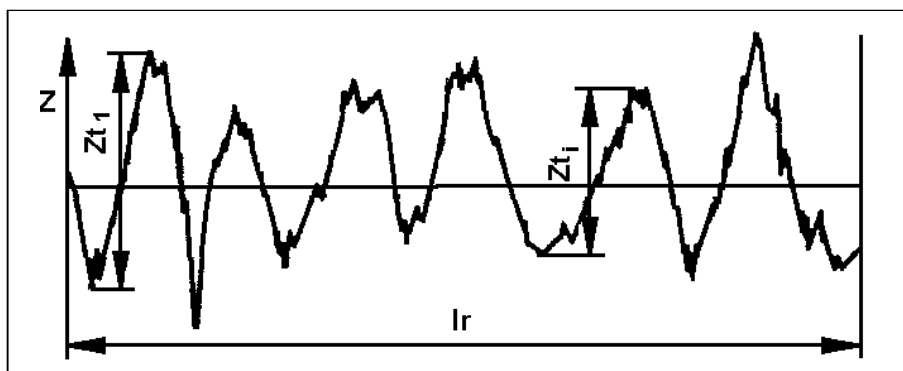
R_v – **největší hloubka prohlubně profilu** – hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r [15],

R_z – **největší výška profilu** – součet výšky Z_p největšího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r [15],



Obr. 4: Parametry R_v , R_p , R_z [15]

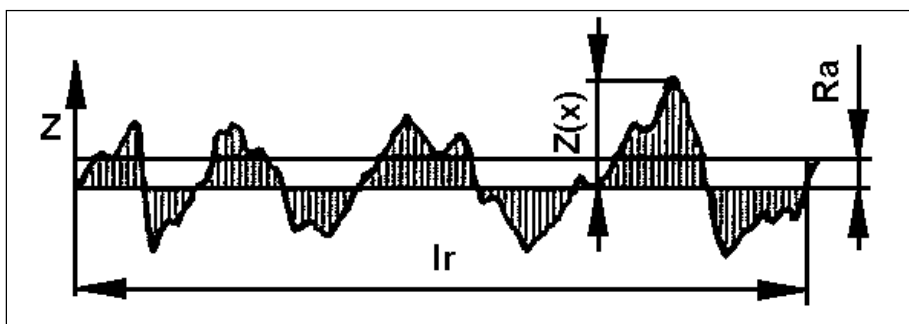
Rc – průměrná výška profilu – průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky l_r , měření Rc vyžaduje zadání jedné vertikální a horizontální hladiny řezu [15],



Obr. 5: Parametr Rc [15]

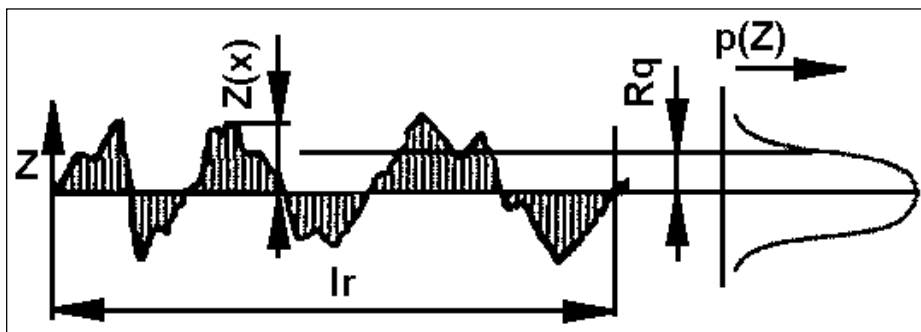
Rt – celková výška profilu – součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejhlubší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky l_n [15],

Ra – střední aritmetická úchylka profilu – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r [15],



Obr. 6: Parametr Ra [15]

Rq – průměrná kvadratická úchylka profilu – průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r [15].



Obr. 7: Parametr Rq [15]

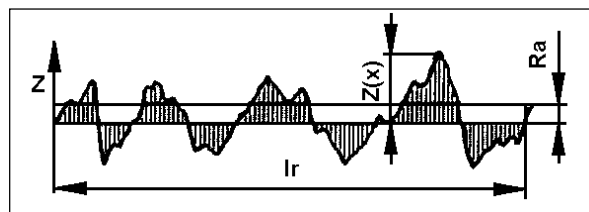
Pro povrchové šetření koncových měrek byla porovnávána drsnost povrchu měřená pomocí AFM mikroskopu. K popisu drsnosti povrchu byly zaznamenávány pouze tři hlavní parametry Ra, Rq a Rt. Dále bude detailně popsáno vyhodnocení těchto tří parametrů.

1. Střední aritmetická úchylka profilu – Ra

Nazývá se též průměrná aritmetická úchylka a je definována jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Vypovídající schopnost parametru Ra je nízká, nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu. Používá se zejména pro značení drsnosti povrchu součástí na výkresu, z čehož posléze vyplývá způsob opracování povrchu součástí [15].

Vzorec pro statistickou metodu určení Ra [16]:

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx [\mu m]$$



Doporučené základní délky lr [mm] jsou: 0,08 0,25 0,8 2,5 8 25 mm

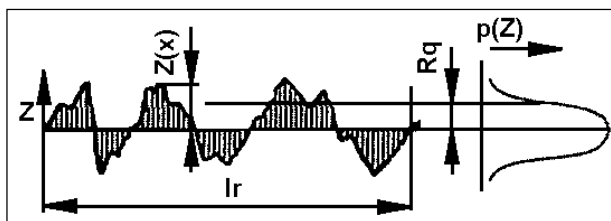
Střední aritmetická úchylka povrchu Ra [μm]	Typická metoda výroby povrchu
0,012 0,025 0,05 0,1 0,2 0,4 0,8	Dokončovací metody (broušení, lapování,
1,6 3,2 6,3 12,5	Běžné obrábění (soustružení, frézování, apod.)
25 50 100 200 400	Povrch polotovarů (výkovky, odlitky, apod.)

2. Střední kvadratická úchylka profilu – Rq

Nazývá se též průměrná kvadratická úchylka. Má význam při statistickém pozorování profilu povrchu, neboť zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic [15].

Vzorec pro statistickou metodu určení R_q [16]:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} [\mu m]$$



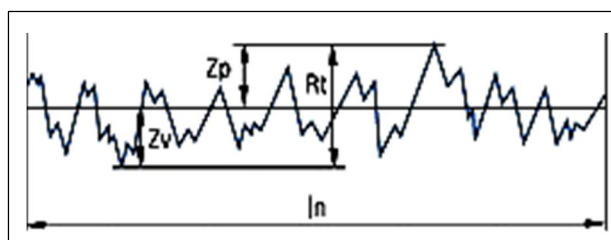
Doporučené základní délky l_r [mm] jsou: 0,08 0,25 0,8 2,5 8 25 mm

3. Celková výška profilu – R_t

Jedná se o nejvyšší hloubku drsnosti, což je svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubší rýze filtrovaného profilu drsnosti uvnitř měřené délky l_n , jinými slovy součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky l_n [15].

Vzorec pro statistickou metodu určení R_t [16]:

$$R_t = Z_p + Z_v [\mu m]$$



Doporučené základní délky l_r [mm] jsou: 0,08 0,25 0,8 2,5 8 25 mm

Příloha 03:

Rentgenová tenzometrie

1. Zbytková napětí v povrchové vrstvě

Zbytková napětí jsou mechanická napětí existující v tělese bez působení vnějších sil. Vznikají převážně při zpracování materiálu v součást. Pro dosažení dobré funkce a životnosti kterékoliv součásti je potřeba dodržet následující parametry obráběné plochy [17]:

- tolerance rozměru,
- tolerance geometrického tvaru,
- drsnost povrchu,
- ostatní vlastnosti povrchové vrstvy.

V našem případě jsme se zaměřili na zbytková napětí v povrchové vrstvě koncových měrek.

Bylo prokázáno, že zbytková napětí po povrchovém opracování více nebo méně, podle druhu materiálu, jeho tepelného zpracování a podle použitých technologických podmínek a způsobu povrchového opracování, zvyšují nebo snižují trvanlivost, pevnost, korozivzdornost, odolnost proti opotřebení a rozměrovou stálost součástí. Z těchto hledisek lze jako příznivější označit zbytková napětí tlaková [17].

Podle toho, v jak velikém objemu se zbytková napětí vyskytují, jsou rozdělována na [17]:

- zbytková napětí I. druhu (makroskopická),
- zbytková napětí II. druhu (mikroskopická),
- zbytková napětí III. druhu (submikroskopická).

Zbytková napětí I. druhu dosahují rovnováhy až v celém makroobjemu zkoumaného vzorku. Vznikají při nestejnoměrném tváření, tepelném zpracování, obrábění atd. Vyskytují-li se tato napětí v součásti, pak po odebrání vrstvy materiálu z jejího povrchu dojde k porušení rovnováhy zbytkových napětí a součást se deformuje [17].

Zbytková napětí II. druhu jsou v rovnováze v mikroskopických objemech materiálu srovnatelných s velikostí jednotlivých krystalů, takže jejich výslednice v makroskopické oblasti je nulová. Vznikají převážně při tváření za studena, při tuhnutí, při změně teploty apod. [17].

Zbytková napětí III. druhu jsou v rovnováze v mikroskopických oblastech vzorku srovnatelných s velikostí elementární buňky. Jsou způsobena poruchami krystalové mřížky, přítomností cizích atomů, vakancí, dislokací apod. [17].

Zbytková napětí I. a II. druhu nezpůsobují změnu tvaru součástí, mají však značný vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu [17].

Všechny tři druhy zbytkových napětí se zpravidla vyskytují současně, předpokládá se však, že největší vliv na kvalitu povrchové vrstvy obrobku budou mít především zbytková napětí I. druhu [17].

Zbytková napětí po broušení lze zjistit u většiny broušených materiálů. Podle použitých řezných podmínek a také podle způsobu broušení mohou být v povrchových vrstvách zbytková napětí v širokých mezích, od vysokých napětí v tahu až ke značným napětím tlakovým [17].

Pro podrobnější hodnocení a pro porovnání výsledků měření zbytkových napětí je vhodné sledovat u grafů znázorňujících jejich průběh tyto tři klíčové hodnoty:

- velikost zbytkového napětí co nejbližší povrchu,
- velikost maximálního zbytkového napětí (pokud pod povrchem je) a jeho hloubku,
- hloubku pod povrchem, ve které se zbytkové napětí rovná nule.

Uvedená hlediska jsou rozhodující pro posouzení broušených součástí vzhledem k jejich funkčnímu použití. Mezi speciální metody broušení se řadí i lapování používané jako dokončovací operace měřících ploch koncových měrek, proto je žádoucí posuzovat u koncových měrek vliv této dokončovací operace na zbytková napětí v jejich povrchové vrstvě [17].

2. Metody měření zbytkových napětí

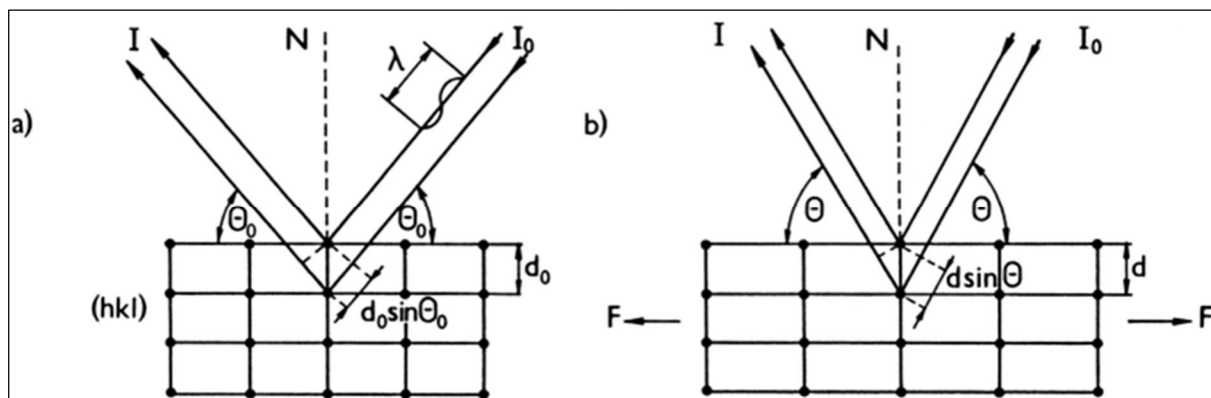
Vývoj v poznání zbytkových napětí byl především závislý na vývoji přesných měřících technik používaných k jejich zjišťování. Byla vyvinuta celá řada způsobů pro měření zbytkových napětí, avšak všechny jsou poměrně zdlouhavé a náročné, jak na měřicí techniku, tak na měřicí zařízení [17]. Používané metody lze v podstatě rozdělit na [17]:

- nepřímé (změny magnetických vlastností, tvrdosti apod.),
- mechanické (destruktivní),
- rentgenografické (nedestruktivní).

V našem případě bylo využito metody rentgenografické, jejíž nespornou výhodou je, že se jedná o metodu nedestruktivní.

3. Měření napětí pomocí rentgenografie

Rentgenografická metoda pro měření zbytkových napětí využívá difrakce svazku rentgenových paprsků k přesnému určení vzájemných vzdáleností atomových mřížkových rovin a jejich relativních změn [17]. Relativní změna mezirovinové vzdálenosti d se projeví změnou difrakčního úhlu (Braggova úhlu) Θ , t. j. $d_0 \rightarrow d \Rightarrow \theta_0 \rightarrow \theta$ (viz obr. 1) [18].



Obr. 1: Deformace vzdáleností mřížkových rovin (hkl) a změny úhlové polohy interferenčního maxima; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou F [18]

Metoda určuje napětí pouze v malé oblasti dané velikostí ozářené plochy vzorku a hloubkou průniku rentgenových paprsků do materiálu. Měření se provádí v povrchové vrstvě tloušťky několika setin milimetrů. Tuto metodu lze použít pouze pro krystalické látky [17].

Velikost napětí zjistíme porovnáním mřížkových deformací, určených ze změn difrakčního úhlu rentgenového paprsku, s deformacemi, které se při daném stavu napjatosti dají očekávat podle teorie elasticity [17].